Numero 324
Agosto 1995
Anno XXVIII
Volume LV

Variazioni glaciali e climatiche in Antartide

Gli studi geomorfologici e l'analisi di «archivi ecologici» come i siti di nidificazione dei pinguini e delle procellarie hanno consentito di ricostruire l'evoluzione dei margini glaciali negli ultimi 20 000 anni

di Carlo Baroni e Giuseppe Orombelli

Circondata da mari tempestosi e immersa nella notte polare per i lunghi mesi dell'inverno australe, l'Antartide è il più remoto continente del nostro pianeta. Sebbene l'esistenza di una Terra Australis Incognita sia stata ipotizzata fin dall'antichità e da taluni vagheggiata come terra ricca e ospitale, soltanto all'inizio del secolo scorso l'uomo raggiunse le coste antartiche, scoprendo un nuovo mondo quasi completamente coperto dai ghiacci, gelido e ostile. Gran parte del territorio era totalmente sconosciuta ancora nel dicembre 1911, quando l'esploratore Roald Amundsen raggiunse il Polo Sud vincendo la sfida con l'eroico e sfortunato capitano Scott.

Di forma vagamente circolare, l'Antartide è quasi interamente confinata oltre il circolo polare; il 98 per cento circa dei 13,9 milioni di chilometri quadrati della sua superficie è coperto dal più grande ghiacciaio della Terra, che ha un volume di 30 milioni di chilometri cubi. In questa enorme massa glaciale è immagazzinato il 90 per cento dei ghiacci terrestri, che corrisponde a circa il 70 per cento dell'acqua dolce dell'intero pianeta.

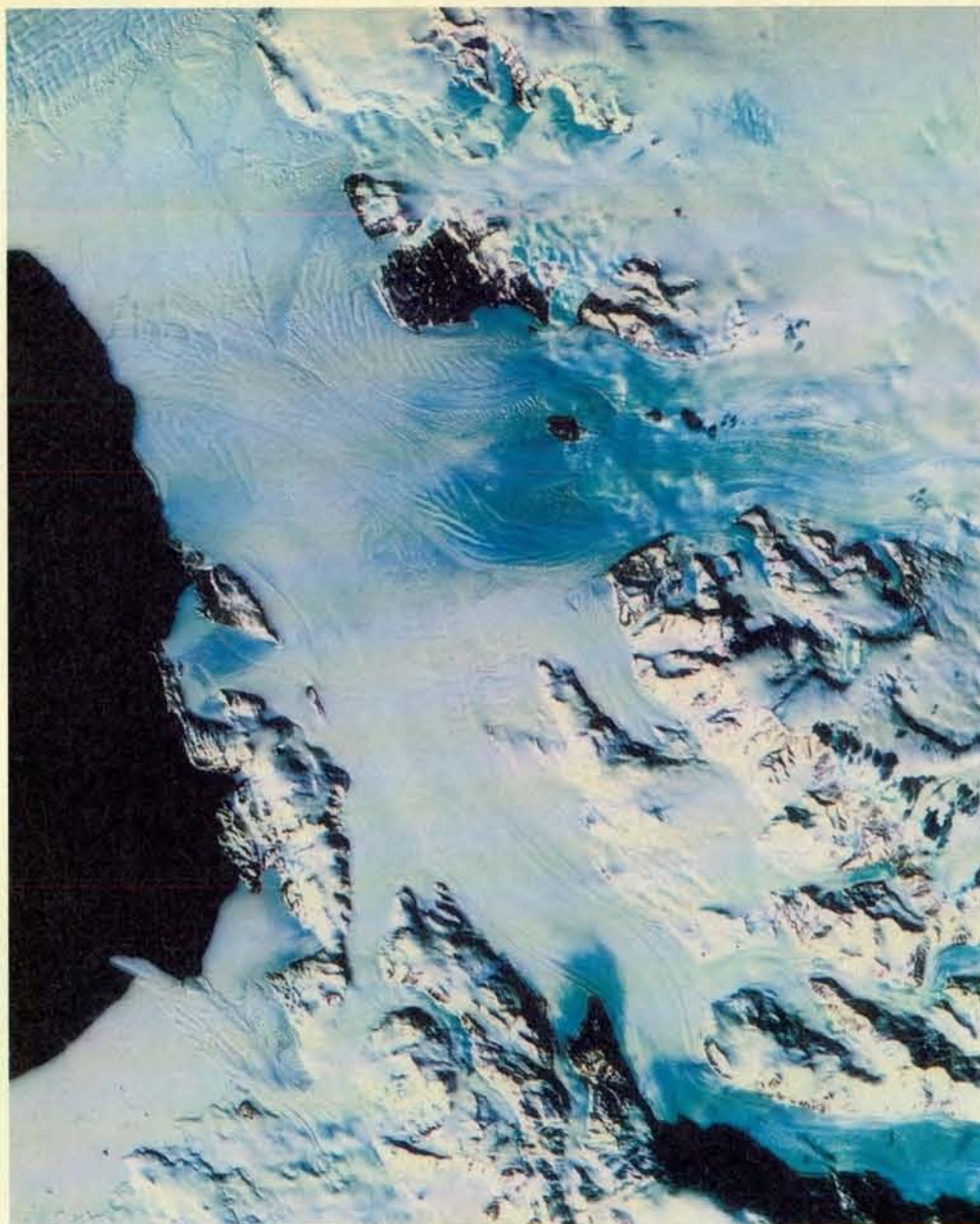
Il grande ghiacciaio antartico, apparentemente unitario, è in realtà costituito da diversi corpi glaciali. La maggior parte del volume totale dei ghiacci è accumulata in due enormi calotte coalescenti, parzialmente separate dalla catena dei Monti Transantartici (si veda l'articolo *La calotta glaciale dell'Antartide* di Uwe Radok in «Le Scienze» n. 206, ottobre 1985): la calotta orientale, che poggia su un substrato roccioso prevalentemente ubicato al di sopra del livello del mare, e quella occidentale che, meno estesa, poggia su fondi marini ed è ancorata a una serie di isole e di arcipelaghi.

Le calotte hanno un profilo convesso, ripido ai margini e subpianeggiante nella porzione sommitale, oltre i 2000 metri di quota, dove si estende l'altopiano polare o *plateau*. Ampie cupole glaciali si innalzano dal *plateau* fino a oltre 4000 metri di quota. Lo spessore dei ghiacci, misurato con metodi geofisici, varia notevolmente da luogo a luogo, in relazione all'andamento del substrato roccioso. Lo spessore medio delle calotte è di 2450 metri, mentre quello massimo, di 4776 metri, è stato misurato in corrispondenza del «bacino sottoglaciale Astrolabe», una grande depressione del substrato roccioso che si spinge fino a 2341 metri sotto il livello del mare.

Le calotte alimentano enormi «fiumi di ghiaccio» (*ice stream*) che trasportano verso il mare notevoli quantità di ghiaccio ogni giorno, dando origine a piattaforme e lingue di ghiaccio galleggianti. Un esempio, nel settore in cui è ubicata la stazione scientifica permanente italiana «Baia Terra Nova», è il ghiacciaio David, che si origina come un fiume di ghiaccio che drena la calotta orientale e alimenta la lingua galleggiante Drygalski, la più estesa del Mare di Ross, nel quale si spinge per circa 100 chilometri, riversandovi 12 chilometri cubi di ghiaccio all'anno.

Le piattaforme di ghiaccio galleggiante, note anche come «barriere» o «tavolati», possono generarsi per coalescenza di varie lingue o essere alimentate direttamente dalle calotte e si sviluppano prevalentemente all'interno di insenature o in prossimità di isole costiere, alle quali sono ancorate, in luoghi ove la temperatura media annua è inferiore a −5 gradi Celsius. Le più estese sono quelle di Ross (525 840 chilometri quadrati, oltre una volta e mezzo l'Italia) e di Ronne-Filchner (472 760 chilometri quadrati), che occupano le ampie insenature dei mari di Ross e di Weddell. Dalle piattaforme e dalle lingue galleggianti si distaccano i caratteristici iceberg tabulari, di dimensioni talora enormi, che si muovono alla deriva nei mari circumantartici. Nel mese di febbraio 1995 dal tavolato di Larsen si è staccato un iceberg delle dimensioni di 78 × 37 chilometri, con un'estensione circa uguale a quella della Provincia di Bergamo. Negli anni precedenti si sono staccate «montagne di ghiaccio» ancora maggiori, come nell'ottobre 1987, allorché dal tavolato di Ross si separò il più grande iceberg mai osservato in questo settore (all'incirca 4540 chilometri quadrati di superficie, più grande della Valle d'Aosta). Il distacco di iceberg costituisce la principale voce negativa del bilancio di massa dell'intera calotta antartica.

I ghiacci antartici costituiscono una porzione rilevante dell'idrosfera terrestre e hanno un ruolo chiave nell'equilibrio ambientale del nostro pianeta. Essi, infatti, interagiscono con l'atmosfera e il sistema climatico, con l'idrosfera e con la litosfera, mediante complessi scambi energetici e di massa. L'Antartide agisce come «refrigeratore» della Terra; ogni cambiamento nella calotta antartica ha conseguenze globali sulla circolazione oceanica e atmosferica e sul livello del mare. Il bilancio di massa della calotta, cioè il rapporto tra accumulo nevoso e ablazione (sia sotto forma di distacco di iceberg, sia sotto forma di fusione e sublimazione dei ghiacci), è di difficile valutazione, e non è noto se attualmente sia attivo, in equilibrio o passivo. È peraltro evidente che le relazioni tra i ghiacciai antartici e il livello del mare sono assai critiche, nel senso che variando il volume dei ghiacci continentali varia anche il livello del mare, ma anche nel senso che quest'ultimo controlla (insieme ai parametri climatici) le dimensioni e il comportamento dinamico dei ghiacciai antartici. Infatti il limite climatico teorico delle nevi persistenti è ubicato largamente al di sotto del livello del mare, così che un eventuale abbassamento di quest'ultimo determinerebbe una netta avanzata dei ghiacciai e, al contrario, una risalita del livello del mare indurrebbe una contrazione dei ghiacciai. Se la totalità dei ghiacci antartici fondesse, il livello del mare aumenterebbe di circa 60 metri, sommergendo ampie aree costiere in tutti i continenti. Sarebbe già sufficente il collasso di porzioni marginali delle calotte antartiche per determinare un innalzamento del livello del mare tale da minacciare numerose città costiere, atolli e basse piane deltizie in tutto il mondo.

Lo stato di salute dei ghiacci antartici non è adeguatamente conosciuto. Secondo le stime, ogni anno si depongono sull'Antartide precipitazioni nevose equivalenti a uno strato d'acqua di 5 millimetri prelevato dall'intera superficie degli oceani. Il quantitativo d'acqua restituito annualmente agli oceani sotto forma di iceberg e di acqua di fusione prodotta alla base delle piattaforme di ghiaccio galleggianti è ritenuto circa eguale, così che le calotte antartiche sarebbero in sostanziale equilibrio, se non in lieve incremento, e

Questo mosaico in falso colore di immagini del satellite SPOT 1, riprese il 19 dicembre 1988, mostra l'area di Baia Terra Nova, ove dal 1985 opera il Programma nazionale di ricerche in Antartide, nel cui ambito si sono svolte le ricerche presentate nell'articolo. L'immagine, la cui base corrisponde a circa 80 chilometri, è stata elaborata nel 1991 da Flavio Borfecchia e Massimo Frezzotti dell'ENEA. La base scientifica italiana si trova presso l'estremità inferiore del tratto di costa rocciosa.

in tal caso rallenterebbero l'innalzamento del livello del mare.

La valutazione dei parametri del bilancio sopra riportati si basa però su dati incerti e troppo scarsi. A ciò si aggiunga che il comportamento dinamico dei ghiacci antartici mostra segni di una variabilità fino a ora insospettata, tali da riproporre la possibilità di fenomeni di instabilità dell'intera calotta o di grandi sue parti. Pertanto, alla domanda di quale possa essere la risposta dei ghiacci antartici a un eventuale riscaldamento climatico per un accentuarsi dell'effetto serra (e quali possano essere le conseguenze per il livello del mare) sono state date risposte contrastanti, a sottolineare la sostanziale incertezza che regna in questo settore.

È pertanto importante conoscere il comportamento dei ghiacci antartici nel passato, in occasione di variazioni climatiche quali quelle che si sono verificate nel Quaternario e in particolare nelle sue fasi più recenti e meglio conosciute. A questo proposito sono particolarmente significativi gli ultimi 20 000 anni, nel corso dei quali il nostro pianeta è passato da condizioni di minimo termico accentuato (ultimo massimo glaciale) a condizioni leggermente più calde delle attuali (Olocene medio, 8000-5000 anni dal presente), attraverso varie fasi (almeno due) di rapido riscaldamento.

Come ha reagito il continente antartico a questi rivolgimenti? È vero, secondo uno stereotipo, che i ghiacci polari antartici (costantemente a temperature inferiori a 0 gradi Celsius) sono pressoché insensibili alle variazioni termiche e risentono solamente delle variazioni di alimentazione e di livello del mare?

Una risposta a questi quesiti può essere ricercata in primo luogo all'interno dei ghiacci stessi. In effetti indicazioni preziosissime, di importanza globale, sulle caratteristiche ambientali del passato sono fornite in modo diretto dalle carote di ghiaccio prelevate con perforazioni delle calotte glaciali. La neve, che lentamente si accumula nelle fredde e alte regioni interne, conserva inalterate nel tempo le proprietà chimiche, che sono in relazione con le condizioni dell'atmosfera al momento in cui sono avvenute le precipitazioni. I ghiacci antartici derivano dal progressivo accumulo di neve che, anno dopo anno, dà origine a una coltre glaciale in cui si conservano in regolare sequenza le tracce delle caratteristiche chimico-fisiche proprie dell'atmosfera entro cui si sono verificate le precipitazioni. Attraverso la perforazione delle calotte si ha pertanto accesso a un archivio di informazioni continuo, relativo alle ultime decine/centinaia di migliaia di anni. La più profonda perforazione antartica sinora eseguita è quella di Vostok, che ha raggiunto una profondità di 2600 metri e abbraccia gli ultimi 220 000 anni.

L'analisi delle carote di ghiaccio perforate nelle parti più interne dell'Antartide fornisce informazioni sulle variazioni dell'accumulo nevoso in funzione delle variazioni di temperatura e sullo spessore delle calotte stesse. Attraverso l'analisi delle bolle d'aria intrappolate nel ghiaccio, è possibile misurare le variazioni di anidride carbonica e metano nell'atmosfera del passato, nonché le variazioni di pressione e di quota della superficie della calotta. Inoltre nei ghiacci perenni sono conservate tracce delle principali eruzioni vulcaniche, che costituiscono precisi livelli di riferimento cronologico.

I principali risultati sin qui acquisiti mostrano variazioni dell'ordine di 6-7 gradi centigradi nell'ambito di un intero ciclo climatico glaciale-interglaciale, della durata di circa 100 000 anni. Variazioni di minore ampiezza e maggiore frequenza si sovrappongono ai principali cicli glaciali-interglaciali e spesso si sono prodotte in tempi molto brevi, dell'ordine di pochi decenni o secoli. I gas-serra (anidride carbonica e metano) variano sistematicamente in fase con le variazioni di temperatura. Le precipitazioni sul *plateau* polare, già assai scarse - dell'ordine di pochi centimetri di acqua equivalente all'anno - si dimezzano durante le fasi più fredde in quanto l'umidità assoluta dell'atmosfera varia in funzione diretta della temperatura. Ne consegue una riduzione dello spessore dei ghiacci dell'ordine del centinaio di metri nelle porzioni più interne del continente. Infine, durante le fasi più fredde aumenta sensibilmente il carico in polveri sospese nell'atmosfera.

In passato le calotte antartiche hanno conosciuto momenti di maggiore estensione della massa glaciale, come documentano le morene deposte e le forme di erosione glaciale osservabili nei rilievi montuosi attualmente liberi da ghiaccio e neve ai margini o a quote più elevate dei ghiacciai attuali. Già Henryk Arctowski, geologo polacco della spedizione de Gerlache (1898-1899), aveva individuato tracce relitte di antiche glaciazioni nella Penisola Antartica. Si ritiene che i primi ghiacciai si siano formati in Antartide intorno a 50 milioni di anni fa (Eocene inferiore-medio), mentre il definitivo affermarsi della calotta glaciale ebbe luogo a partire da circa 20 milioni di anni fa (Miocene). Si trattava, tuttavia, di calotte con caratteristiche termiche e dinamiche diverse da quelle attuali, simili a quelle dei ghiacciai montani delle regioni temperate, caratterizzati da temperature sempre prossime a quella di fusione, con abbondante circolazione d'acqua.

Nel Mio-Pliocene si sono verificate importanti variazioni glaciali nel corso delle quali i ghiacciai avrebbero raggiunto le massime dimensioni, non più successivamente ripetute. Da circa due milioni di anni le condizioni ambientali sono drasticamente mutate, nel senso che le calotte hanno assunto caratteristiche polari, con temperature nettamente più rigide e sostanziale assenza d'acqua di fusione.

Per conoscere il comportamento dei margini delle calotte nel passato occorre indagarne le tracce lasciate sotto forma di depositi o di forme di erosione lungo i tratti costieri liberi dai ghiacci o nelle aree montuose più rilevate, sporgenti dai ghiacci stessi o, infine, nei fondali marini della piatta-

L'area riquadrata in rosso nella mappa generale dell'Antartide, in cui è compresa la stazione di ricerca italiana di Baia Terra Nova, viene rappresentata qui a lato con l'indicazione dei principali riferimenti di luogo richiamati nell'articolo. La datazione degli «archivi ambientali» costituiti da antichi siti di nidificazione di pinguini e procellarie ha consentito una ricostruzione delle vicissitudini climatiche di questa regione nel corso dell'Olocene.

forma continentale. Da lungo tempo si dibatte sulle dimensioni e sull'estensione che le calotte antartiche hanno raggiunto durante l'ultimo periodo di massima espansione glaciale (culminato intorno a 20 000 anni fa) e sui meccanismi che ne hanno determinato le successive modificazioni.

Vari modelli sono stati proposti sulla base di dati geologici raccolti nelle aree emerse, di campagne geologico-marine e di considerazioni glaciologiche. Esiste un sostanziale accordo sul fatto che durante l'ultima glaciazione i ghiacciai antartici si siano espansi in mare occupando direttamente porzioni più o meno ampie della piattaforma continentale. Estese piattaforme galleggianti di ghiaccio dovevano coronare la grande calotta antartica. Il limite del *pack*, o banchisa, la sottile crosta di ghiaccio spessa pochi metri che si forma stagionalmente per congelamento dell'acqua di mare, si doveva spingere diverse centinaia di chilometri più a nord di quello attuale. Permane un forte contrasto di opinioni circa lo sviluppo verticale della grande calotta antartica. Da un lato c'è chi propone un modello ciclopico, con una calotta in gran parte al di sopra dei 3000 metri e un'ampia zona sommitale oltre i 4000 metri; dall'altro chi suggerisce ricostruzioni minimali, con dimensioni dei ghiacciai di poco superiori a quelle attuali.

Nel grafico sono riassunti i dati ottenuti dalle carote di ghiaccio di Vostok riguardo alle variazioni di temperatura (*al centro*) e di concentrazione atmosferica di anidride carbonica (*in alto*) e metano (*in basso*) negli ultimi 220 000 anni. (Diagrammi modificati da Jouzel *et al.*, 1993.)

Dati desunti dalle perforazioni in ghiaccio indicano che la più alta quota raggiunta dalla calotta nell'ultimo massimo glaciale era inferiore o tutt'al più uguale a quella attuale. Per contro, nella fascia costiera, la calotta era più estesa e rigonfia. Alcune aree costiere e ampi settori delle catene montuose erano sicuramente liberi dai ghiacci anche intorno a 20 000 anni fa, come documentato da siti di nidificazione abbandonati di procellaria delle nevi (*Pagodroma nivea*) datati con il metodo del carbonio 14. Infatti, questi uccelli nidificano su scogliere e pareti rocciose e producono, nei pressi del nido, depositi stratificati di sostanze organiche che costituiscono significativi documenti geologici e paleoambientali. Lo studio della distribuzione dei nidi antichi e la loro datazione con il carbonio 14 consentono di delimitare le aree deglaciate nell'ultimo massimo glaciale.

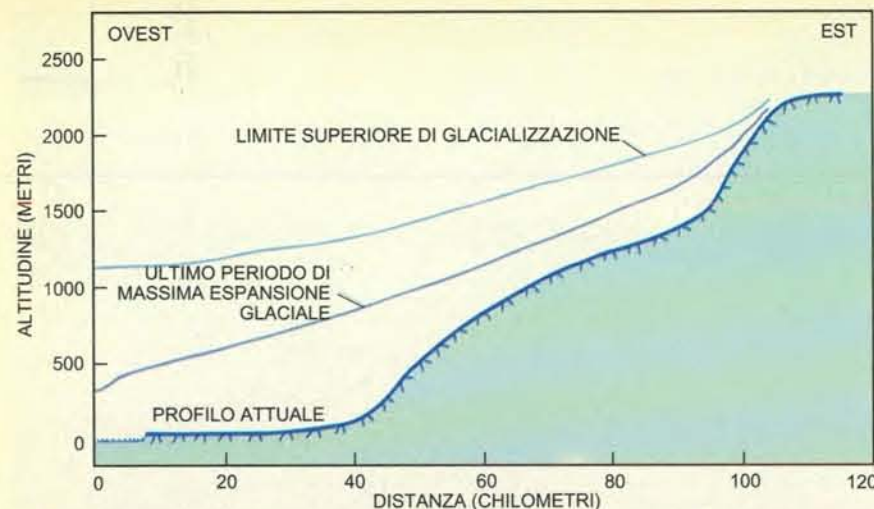
La questione delle dimensioni massime raggiunte dalla calotta non è di poco conto nelle ricostruzioni paleoclimatiche e paleoambientali, particolarmente riguardo al livello del mare e all'albedo (percentuale della radiazione solare riflessa), entrambi parametri necessari per l'elaborazione dei modelli di circolazione atmosferica globale.

Una zona chiave per la definizione delle dimensioni della calotta antartica durante l'ultimo massimo glàciale è la zona del Mare di Ross. Recenti dati raccolti in mare (dati geofisici, carotaggi di sedimenti marini, analisi sedimentologiche e petrografiche, datazioni con il carbonio 14 di gusci di foraminiferi) suggeriscono che le calotte orientale e occidentale siano avanzate nell'insenatura del Mare di Ross di oltre 1000 chilometri, saldandosi tra loro fino a occupare quasi interamente la piattaforma continentale. In particolare, il limite tra i ghiacci poggianti su fondali marini e le piattaforme galleggianti (*grounding line*) era posto, lungo la costa occidentale, intorno a 73 gradi di latitudine sud, immediatamente a nord dell'Isola Coulman, mentre oggi si trova oltre gli 85 gradi di latitudine sud. Durante l'ultimo massimo glaciale la fascia costiera della Terra Vittoria era coperta da ghiaccio per centinaia di metri al di sopra dell'attuale livello dei ghiacciai, come ben documentato dalla distribuzione dei depositi glaciali e dal limite erosionale di glacializzazione (*trimline*).

La fase di ritiro che ha seguito l'ultimo massimo glaciale è iniziata intorno a 17 000 anni fa e si è conclusa circa 8000 anni fa. Il ritiro non si è verificato in modo graduale e continuo, ma con modalità più complesse e articolate. Nel settore di Baia Terra Nova, per esempio, sono state osservate morene recessionali a quote comprese tra i ghiacciai attuali e il livello più elevato raggiunto dai ghiacci nell'ultimo massimo glaciale. Tali morene documentano, in un quadro di generale recessione, un'articolazione di fasi di ritiro intervallate da momenti di stasi o da modeste riavanzate. Queste evidenze trovano una conferma anche in altre fonti di informazione, quali le date al carbonio 14 ottenute da organismi associati a sedimenti marini e da resti di nidi di uccelli nelle aree evacuate dai ghiacci pleistocenici.

Nuovi dati, significativi ai fini della ricostruzione delle tappe del ritiro glaciale e della storia ambientale olocenica, sono stati forniti dai nostri studi sulla distribuzione delle colonie abbandonate di pinguini di Adelia (*Pygoscelis adeliae*) presenti nella fascia costiera su spiagge emerse oloceniche, terrazzi marini e nelle aree circostanti. Questi pinguini sono i più resistenti tra tutti i pigoscelidi in condizioni ambientali estreme. Essi nidificano nelle zone deglaciate della fascia costiera, vivono in colonie di diverse migliaia di individui e hanno una forte tendenza a ritornare nelle stesse colonie da cui provengono. La loro dieta è prevalentemente rappresentata da *krill* (*Euphausia superba*) e, molto subordinatamente, da piccoli pesci e cefalopodi. I fattori che controllano la presenza e la distribuzione delle colonie sono la necessità di aree costiere prive di copertura di ghiaccio idonee alla nidificazione, l'accesso al mare (assenza di banchisa costiera persistente), la disponibilità di cibo, i predatori e, soprattutto, le condizioni climatiche. Tra queste ultime, in particolare, la temperatura controlla l'estensione del ghiaccio marino e la disponibilità di cibo, il successo della nidificazione-riproduzione e la mortalità per la ricerca del cibo.

Attualmente, durante l'estate australe, più di un milione di coppie di pinguini di Adelia nidificano nella zona del Mare di Ross, occupando 26 colonie tra Capo Adare e l'Isola di Ross, dove (a Capo Royds) si trova la colonia di pinguini più meridionale della Terra. Il numero totale dei pinguini presente in quest'area ogni anno sfiora i 5 milioni (circa la metà della popolazione mondiale di questa specie), se si considera-

Nel settore di Baia Terra Nova, ad Andersson Ridge, è stata osservata una morena recessionale a quota inferiore di circa 300 metri rispetto al livello più elevato raggiunto dai ghiacci nell'ultimo periodo di massima espansione. Questa morena (*in primo piano nella fotografia in alto*) documenta un'articolazione delle fasi di ritiro glaciale, che furono intervallate da momenti di stasi o da modeste riavanzate. Con un bacino di alimentazione di 224 000 chilometri quadrati (oltre 2/3 della superficie dell'Italia), il Ghiacciaio David (*fotografia in basso*) drena la calotta orientale dell'Antartide e dà origine alla lingua di ghiaccio galleggiante Drygalski, la più estesa del Mare di Ross, nel quale riversa 10 chilometri cubi di ghiaccio ogni anno muovendosi alla velocità media di 600-700 metri all'anno. L'enorme lingua galleggiante Drygalski (circa 100 chilometri di lunghezza) delimita verso sud Baia Terra Nova, la quale è caratterizzata da un'importante *polynja* costiera (porzione di mare che resta costantemente libera dai ghiacci marini, spinti al largo dai venti catabatici che scendono in permanenza dall'altopiano polare). Ciclicamente la lingua si distacca determinando notevoli modificazioni ambientali lungo la costa della Terra Vittoria meridionale. Tra queste modificazioni sembra molto significativa la presenza o meno di una estesa e persistente banchisa costiera che, a sua volta, sembra in grado di influire sull'insediamento di colonie di pinguini di Adelia.

Sulla base della distribuzione dei depositi glaciali e delle forme di erosione è stato possibile ricostruire il profilo del ghiacciaio Reeves (Baia Terra Nova) nel corso dell'ultimo periodo di massima espansione glaciale e anche il limite superiore di glacializzazione. Si noti che entrambe le superfici convergono verso monte, a dimostrazione del fatto che lo spessore della calotta non è mai stato molto dissimile da quello attuale, anche se considerevoli incrementi della massa glaciale hanno interessato le aree più prossime alla costa durante le diverse fasi di espansione glaciale.

no anche gli esemplari che non hanno raggiunto l'età riproduttiva. Le colonie attuali sono concentrate in due aree principali, la prima sulle coste della Terra Vittoria settentrionale, tra Capo Adare e l'Isola di Coulman e, la seconda, sulle isole più meridionali del Mare di Ross (isole di Franklin, di Beaufort e di Ross). Una terza e meno colonizzata area è quella di Baia Terra Nova.

I siti abbandonati di colonie di pinguini sono facilmente identificabili per la presenza di un sottile strato di piccoli ciottoli ben selezionati, raccolti per la costruzione dei nidi. Queste plaghe di ciottoli coprono suoli con profilo differenziato in distinti orizzonti, che forniscono resti organici databili con il carbonio 14, come ossa, penne, frammenti di uova e guano. La ricerca sistematica dei siti abbandonati di colonie di pinguini nella Terra Vittoria ha consentito di trovarne le tracce in una trentina di località, molte delle quali in tratti di costa oggi del tutto privi di colonie. La datazione dei suoli ornitogenici con il metodo del carbonio 14 ha consentito di studiare la variazione nel tempo della distribuzione e della frequenza delle colonie di pinguini. Finora sono state ottenute oltre cento date, comprese tra il presente e 13 000 anni fa. Quest'ultima data documenta il momento di insediamento della più antica colonia di pinguini finora rinvenuta in Antartide, ubicata presso Capo Hickey (a nord del Ghiacciaio Mawson, nella Terra Vittoria meridionale). In quest'area, tra 13 000 e 11 000 anni fa, dovevano esistere condizioni ambientali tali da consentire l'accesso ai pinguini e, pertanto, i ghiacciai dovevano occupare posizioni simili a quelle attuali. L'accesso alla terraferma doveva essere consentito da un braccio di mare apertosi entro l'insenatura di Ross ancora in parte occupata da ghiacci ancorati al fondo o galleggianti.

Sulla base dei nuovi dati forniti dalle colonie abbandonate di pinguini, anche in Antartide potrebbero essere effettivamente documentate due principali fasi recessionali della calotta, correlabili alle due fasi di deglaciazione identificate dagli studi dei sedimenti oceanici e dei ghiacci polari. La prima fase di deglaciazione, che ha portato l'ingresso di colonie di pinguini nella Terra Vittoria meridionale, trova riscontro nei dati paleoclimatici ottenuti dalla perforazione di Vostok, ove la curva della temperatura desunta dalle analisi isotopiche inizia a salire dai valori minimi attorno a 16 000 anni dal presente, raggiungendo valori massimi, di poco inferiori a quelli attuali, attorno a 13 000 anni fa. Nella stessa carota la temperatura si abbassa un po' tra 12 500 e 11 500 anni fa, per risalire definitivamente attorno a 11 000 anni fa.

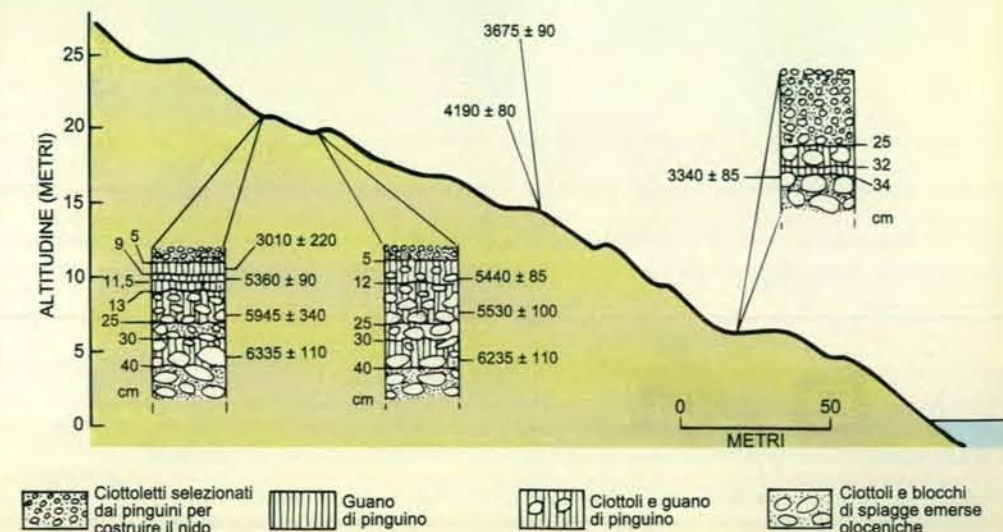
Il ritiro dei ghiacciai in Antartide è stato accompagnato dall'ingressione marina e dal sollevamento glacio-isostatico delle aree costiere, che ha portato alla formazione di spiagge emerse oloceniche. La quota massima di queste spiagge varia da luogo a luogo, in relazione sia a un diverso recupero isostatico di distinte porzioni di continente, sia alla diversa permanenza di piattaforme galleggianti annidate nelle baie più protette. Queste, pur consentendo il recupero isostatico, avrebbero sottratto le coste all'azione marina, impedendo la registrazione del sollevamento attraverso l'accumulo di depositi litorali. La curva di emersione da noi ottenuta nel settore di Ross è la prima per l'intera Antartide e mostra un sollevamento dei territori costieri dell'ordine di circa 30 metri. Numerose date al carbonio 14 ottenute da resti di conchiglie (*Adamussium colbecki* e *Laternula elliptica*) contenute in sedimenti marini, oltre alle date fornite dalle colonie abbandonate di pinguini presenti sulle spiagge oloceniche, hanno consentito di tracciare una curva che indica tassi di emersione compresi tra 10 millimetri all'anno tra 8000 e 6000 anni fa e 2 millimetri all'anno negli ultimi 3000 anni circa.

Da 7000 anni fa ai nostri giorni è documentata la pressoché continua presenza dei pinguini nella Terra Vittoria, pur essendo testimoniate alcune significative concentrazioni del numero di colonie in ristretti intervalli di tempo e ancor più significative lacune. Infatti, le ricerche da noi svolte lungo la costa della Terra Vittoria per un'estensione di 400 chilometri hanno messo in evidenza che i fattori limitanti la presenza dei pinguini sono variati più volte durante l'Olocene. Alcune colonie sono state occupate con continuità per lunghi intervalli di tempo, a indicare che le condizioni favorevoli sono perdurate a lungo. L'esempio più caratteristico è rappresentato dalla colonia dell'isola Inexpressible, favorita dalla presenza di una *polynja* (vale a dire di un tratto di mare privo di ghiaccio marino anche nella stagione invernale) e occupata con continuità da oltre 6000 anni fa a oggi (si veda l'articolo *Le polynja antartiche* di Arnold L. Gordon e Josefino C. Comiso in «Le Scienze» n. 240, agosto 1988).

Un elevato numero di date e di siti colonizzati si colloca nell'intervallo compreso tra 4000 e 3000 anni circa dal presente, che rappresenta un momento di massima diffusione dei pinguini. In quel periodo, lungo le coste della Terra Vittoria, tra la Baia di Wood e Capo Ross, ove attualmente vi sono tre sole colonie, ne esistevano invece una decina. Nel millennio successivo ben sette dei siti occupati risulta-

La prima curva di emersione per le coste antartiche è stata ottenuta a Baia Terra Nova, dove le più elevate tracce dell'azione marina nell'Olocene si riscontrano intorno a 30 metri sul livello del mare. La curva è stata ricostruita sulla base di età ottenute con il metodo del carbonio 14 da conchiglie marine (al di sotto della curva) raccolte in sedimenti litorali e da suoli organici rinvenuti alla base di siti abbandonati di colonie di pinguini (al di sopra della curva). Il tasso di emersione della costa fu inizialmente di 10 millimetri all'anno e si ridusse a circa 2 millimetri all'anno negli ultimi tre millenni. I trattini orizzontali rappresentano la deviazione standard rispetto all'età ottenuta in ogni sito, rappresentata dai quadrati neri.

Il ritiro dei ghiacciai che ha fatto seguito all'ultimo periodo di massima espansione glaciale ha indotto un sollevamento glacio-isostatico delle aree costiere, determinando la formazione di spiagge emerse oloceniche, come queste fotografate sull'isola Inexpressible. Qui si possono osservare numerosi cordoni di ciottoli e blocchi ad andamento subparallelo. Scarse sono le evidenze di spiagge sabbiose fossilifere, mentre più diffusi risultano i resti di colonie abbandonate di pinguini.

Sull'isola Inexpressible è stato determinato il profilo topografico di spiagge emerse oloceniche caratterizzate dalla presenza di suoli ornitogenici. Lungo questo profilo le spiagge si spingono fino a 25 metri sul livello del mare. È qui evidenziata la stratigrafia alla scala dei centimetri di suoli originati dall'accumulo di guano alla base di siti abbandonati di colonie di pinguini. Si noti la sovrapposizione dei depositi con le relative età al carbonio 14 che dimostrano la successione di diverse fasi di insediamento.

I pinguini di Adelia selezionano piccoli ciottoli per costruire il proprio nido. L'accumulo di resti di pinguino al di sotto dei nidi (guano, ossa, carcasse, frammenti di uova e penne) dà origine ai cosiddetti suoli ornitogenici che possono essere datati facilmente con il metodo del carbonio 14.

no bruscamente e contemporaneamente abbandonati e non più rioccupati. Ciò sembra indicare un repentino peggioramento delle condizioni che favoriscono la presenza dei pinguini. Questo evento si colloca in un momento che, nell'emisfero boreale, definisce il limite tra sub-boreale e sub-atlantico e coincide con una generalizzata fase di avanzata glaciale.

Le variazioni climatico-ambientali che hanno influenzato la presenza e la distribuzione delle colonie di pinguini hanno influito anche sui ghiacciai della fascia costiera. Le informazioni in proposito sono peraltro ancora parziali e contraddittorie. Ciò è principalmente dovuto allo scenario glaciale che, in Antartide, è molto ampio e vario, con corpi glaciali a scala da continentale a locale, caratterizzati da diversa inerzia ed esposti a differenti condizioni limitanti, climatiche e ambientali. Ne conseguono comportamenti difformi, così che si richiede estrema cautela per estendere le conoscenze locali alla totalità dei ghiacci antartici.

Per quanto riguarda le informazioni finora ottenute dalle carote di ghiaccio in Antartide, principalmente attraverso lo studio della composizione degli isotopi stabili, il clima nelle regioni interne dell'Antartide sarebbe stato sostanzialmente stabile durante l'Olocene. Sono state osservate solamente variazioni minori e spesso contraddittorie da una località all'altra. Così, per esempio, la Piccola Età Glaciale è chiaramente riconoscibile come un modesto raffreddamento climatico nell'intervallo tra il 1500 e il 1850 d. C. nelle perforazioni al Polo Sud e nel tavolato di Ronne, mentre altrove non è individuabile, oppure il medesimo intervallo di tempo è addirittura caratterizzato da un segnale opposto.

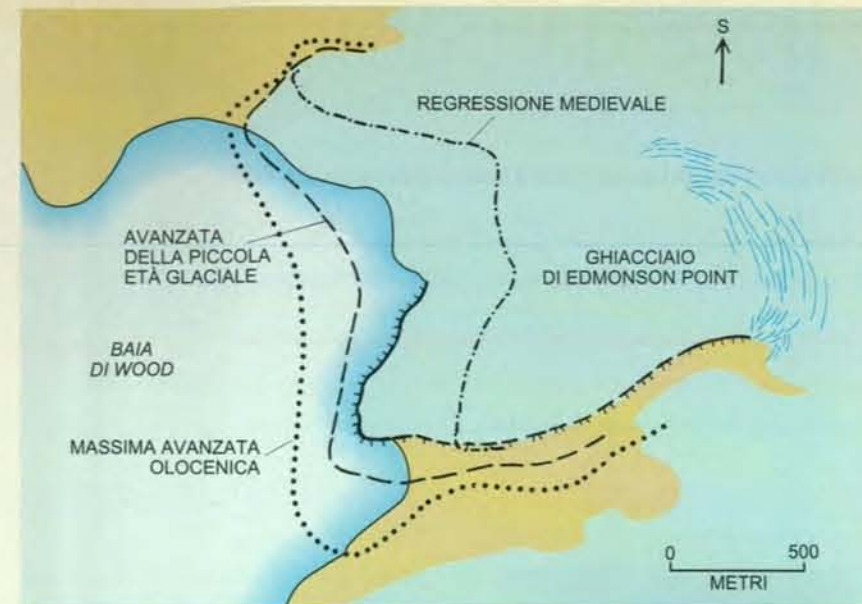
Grazie allo studio delle evidenze geologico-glaciali nelle aree deglaciate, principalmente costiere, si è potuto stabilire che nella prima metà dell'Olocene le piattaforme di ghiaccio di Baia Terra Nova e quelle della Penisola Antartica erano meno estese di quanto non siano attualmente, mentre in altre parti dell'Antartide sarebbero stati osservati indizi di avanzata.

Nel territorio di Baia Terra Nova, dopo il ritiro che ha seguito l'ultimo periodo di massima espansione glaciale, durante l'*optimum* climatico olocenico, tra 7500 e 5000 anni fa, le piattaforme Nansen e Hells Gate erano meno estese di quanto non siano ora.

Nella seconda metà dell'Olocene sia i ghiacciai locali sia le piattaforme sono avanzati sino a raggiungere posizioni più estese di quelle attuali sebbene non si disponga di un controllo cronologico adeguatamente dettagliato. Avanzate posteriori all'*optimum* climatico olocenico (Neoglaciale) sono documentate sia per i ghiacciai sia per le piattaforme galleggianti nella Penisola Antartica, nelle isole subantartiche, alle Vestfold Hills (Antartide orientale) e nella Terra Vittoria settentrionale.

Nel settore da noi studiato, alcuni ghiacciai mostrano chiaramente di avere avanzato le loro fronti in epoca recente, deponendo morene sopra spiagge emerse oloceniche. In particolare, il ghiacciaio di Edmonson Point, nell'intervallo tra il X e il XIV secolo d. C., e cioè durante il periodo caldo medievale (ben noto nella storia climatica e glaciale dell'emisfero settentrionale), aveva una fronte arretrata di almeno 350 metri dalla massima posizione raggiunta nell'Olocene. Ciò è documentato da una decina di date ottenute con il metodo del carbonio 14 da conchiglie inglobate nelle morene a nucleo di ghiaccio presenti al margine del ghiacciaio. Una fase di avanzata, che si è verificata successivamente al XIV secolo e quindi durante la «Piccola Età Glaciale», ha portato la fronte almeno una cinquantina di metri oltre la posizione attuale. Analogo comportamento hanno avuto ghiacciai delle isole subantartiche e della Penisola Antartica, che hanno conosciuto 2-3 fasi di avanzata dopo il XII-XIII secolo.

Le indagini svolte nelle diverse parti dell'Antartide hanno mostrato che, nel Quaternario superiore, le maggiori variazioni di volume ed estensione delle calotte antartiche sono modulate, nelle regioni interne, dalle variazioni dell'accumulo nevoso (che è funzione diretta della temperatura) e, ai margini del continente, dalle variazioni del livello marino. Comportamenti in antifase rispetto agli altri margini antartici sono propri dei ghiacciai delle Valli Secche, per le peculiari condizioni locali.

Le variazioni climatiche minori, tardiglaciali e oloceniche, sono state percepite dai ghiacci antartici che hanno mostrato variazioni, sia pure contenute, sostanzialmente in fase con tali eventi. Se la porzione più settentrionale della Penisola Antartica e le isole subantartiche sono sicuramente esposte all'attuale fase di riscaldamento, come dimostrato dal rapido disfacimento di piattaforme, anche le regioni costiere a latitudine più elevata appaiono essere state sensibili durante l'Olocene alle modeste variazioni termiche, in modo particolare le piattaforme terminanti in mare, come pure i ghiacci marini. Si può pertanto concludere che una eventuale prosecuzione della tendenza in atto al riscaldamento climatico non rimarrebbe senza effetti sui ghiacci antartici, con conseguenze diverse nelle fasce costiere rispetto all'interno della calotta.

Per quanto riguarda l'eventuale apporto dei ghiacci antartici alle variazioni del livello del mare, poiché entrano in gioco anche fattori interni di instabilità delle masse glaciali, in particolare dei «fiumi di ghiaccio» che drenano la calotta e delle piattaforme di ghiaccio galleggianti, una risposta potrà venire dalle perforazioni in ghiaccio progettate in Antartide. Si potrà, per esempio, accertare se la calotta antartica occidentale sia scomparsa o abbia subito una drastica riduzione durante l'ultimo interglaciale, verificatosi circa 130 000-115 000 anni fa, quando la temperatura media terrestre era di circa 2 gradi centigradi più elevata e il livello del mare di alcuni metri più alto di oggi.

Dalle nuove tecnologie di misure satellitari ci si attende nei prossimi anni una valutazione più attendibile delle condizioni generali delle calotte e del loro bilancio, mentre gli studi in corso sul comportamento dinamico dei «fiumi di ghiaccio» e sulla stabilità delle piattaforme galleggianti di ghiaccio dovranno fornire i dati necessari per poter modellizzare correttamente la risposta delle calotte alle modificazioni ambientali.

Per ora non rimane che mantenere vivo l'interrogativo senza accontentarsi delle risposte finora date, che vengono frequentemente e acriticamente ripetute e utilizzate nelle costruzioni di modelli, con un effetto di autocertificazione non meritato, tenuto conto dei dati incompleti e contraddittori su cui sono ancora basate. Dal passato geologico, anche recente, viene il monito che le possibilità della natura nel campo delle variazioni climatiche e ambientali sono assai più ampie di quelle da noi finora misurate o sperimentate.

Nello schema in alto vengono rappresentate le variazioni, succedutesi nel corso dell'Olocene, della fronte del ghiacciaio di Edmonson Point. Le aree in giallo sono attualmente libere da ghiacci. Del ghiacciaio è mostrato uno scorcio in fotografia.

Sulle creste rocciose che emergono dai ghiacci si può individuare il massimo limite raggiunto dai ghiacciai, al di sopra del quale si stagliano aguzzi pinnacoli rocciosi.

CARLO BARONI è ricercatore presso il Dipartimento di scienze della Terra dell'Università di Pisa. È membro del Gruppo nazionale geografia fisica e geomorfologia del CNR e del Comitato glaciologico italiano. Ha svolto ricerche di geomorfologia e geologia glaciale nella regione alpina e ha partecipato a quattro spedizioni del Programma nazionale di ricerche in Antartide.

GIUSEPPE OROMBELLI è ordinario di geografia fisica presso il Dipartimento di scienze dell'ambiente e del territorio dell'Università di Milano. È responsabile del progetto «Glaciologia e paleoclima» del Programma nazionale di ricerche in Antartide e ha preso parte a quattro spedizioni in quel continente.

BARONI C. e OROMBELLI G., *Holocene Raised Beaches at Terra Nova Bay* in «Quaternary Research», 36, pp. 157-177, Victoria Land, Antarctica, 1991.

DENTON G.H., PRENTICE M.L. e BURCKLE L.H., *Caenozoic History of the Antarctic Ice Sheet* in *The Geology of Antarctica*, a cura di R.J. Tingey, Oxford University Press, 1991.

FREZZOTTI M., *Glaciological Study in Terra Nova Bay, Antarctica, Inferred from Remote Sensing Analysis* in «Annals of Glaciology», 17, pp. 63-71, 1993.

JOUZEL J., *Les enregistrements climatiques du Groënland et de l'Antartique au course du dernier cycle climatique* in «Il Quaternario», 7(1b), pp. 267-274, 1993.

JOUZEL J. e altri, *Vostok Ice Cores: Extending the Climate Signal over the Penultimate Glacial Period* in «Nature», 364, pp. 407-412, 1993.

BARONI C. e OROMBELLI G., *Abandoned Penguin Rookeries as Holocene Palaeoclimatic Indicators in Antarctica* in «Geology», 22, pp. 23-26, 1994.

L'infestazione da nematodi

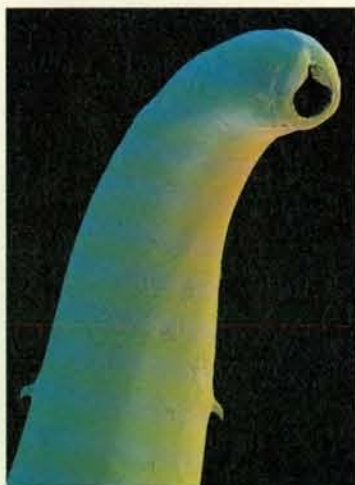
Ritarda l'accrescimento e lo sviluppo intellettivo di milioni di bambini, ma è pressoché ignorata dalla ricerca farmaceutica nonostante le ottime possibilità di trovare un vaccino

di Peter J. Hotez e David I. Pritchard

Se ogni essere umano al mondo venisse sottoposto a visita medica, si scoprirebbe che circa un miliardo di individui - più o meno un quinto della popolazione mondiale - ospita nematodi (comunemente detti vermi intestinali) nell'intestino tenue. Questi parassiti lunghi poco più di un centimetro sono particolarmente insidiosi perché, con le loro aguzze lamine faringee, si fissano alla mucosa e agli strati immediatamente sottostanti della parete intestinale e ne estraggono sangue. Ognuno di essi sottrae ogni giorno al circolo una quantità di sangue non superiore a una frazione di cucchiaino da tè, ma quando 20, 100 o addirittura 1000 nematodi agiscono simultaneamente (consumando, nel caso più grave, l'equivalente di una tazza di sangue al giorno), le conseguenze possono essere molto gravi.

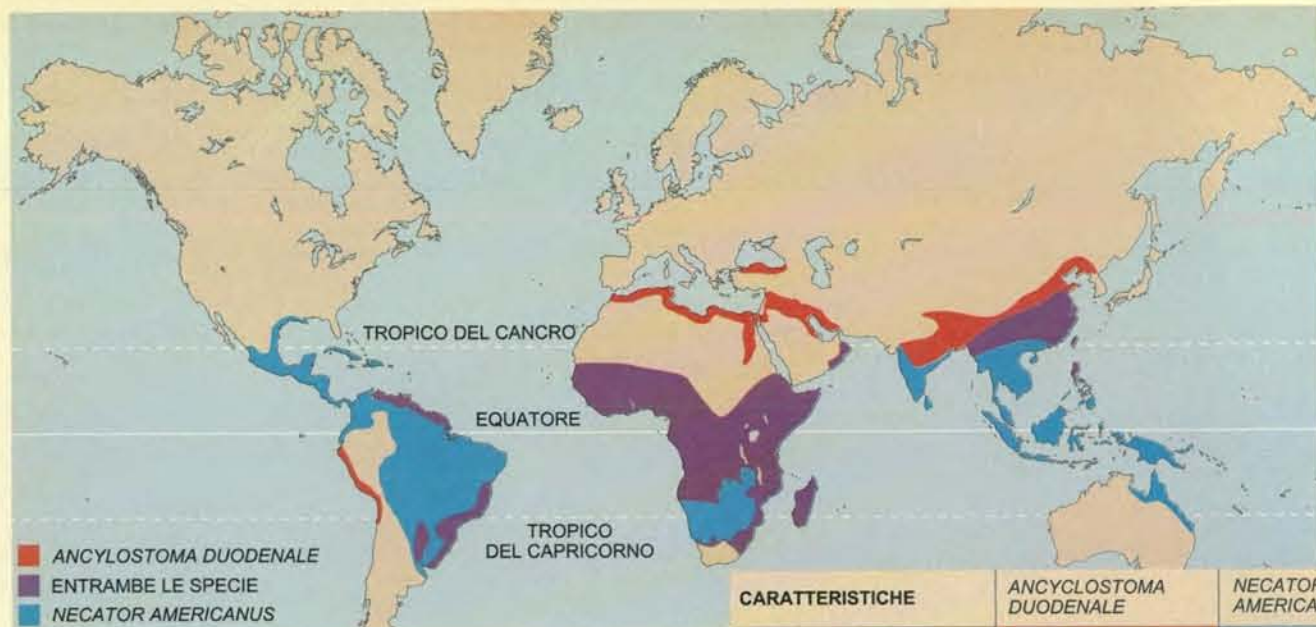
Il sangue trasporta ferro, proteine e altre sostanze nutritive ai tessuti. Se l'ospite non riesce a compensare rapidamente gli elementi nutritivi perduti (come spesso accade nel caso di bambini, donne in età riproduttiva e individui malnutriti), possono instaurarsi anemia da carenza di ferro e deprivazione proteica, che segnano il passaggio da una infestazione di lieve entità a una patologia conclamata. L'anemia e la deprivazione proteica, che si manifestano anche nel 25 per cento degli individui infestati, possono provocare estrema letargia e debolezza. Quel che è peggio, nei bambini che ospitano nell'intestino molti nematodi la carenza di ferro e proteine può causare un grave ritardo della crescita e pregiudicare, a volte irreversibilmente, lo sviluppo comportamentale, cognitivo e motorio. Talvolta questa infestazione può essere addirittura letale, soprattutto nei neonati.

L'infestazione da nematodi, che è particolarmente diffusa nei paesi tropicali in via di sviluppo, può essere curata. Tuttavia, in molte regioni dove essa è comune, i farmaci adatti - agenti antiparassitari e talvolta integratori a base di ferro - possono essere non disponibili o difficili da ottenere. Per questa e altre ragioni vi è urgente necessità di vaccini capaci di impedire ai vermi intestinali di insediarsi stabilmente nell'ospite. Purtroppo, però, negli ultimi 25 anni questa patologia è stata per lo più ignorata dalla comunità dei ricercatori in campo biomedico. I motivi sono molto semplici: i finanziamenti per le ricerche sulle malattie che colpiscono soprattutto il Terzo Mondo sono scarsi, e i nematodi sono difficili da mantenere in laboratorio. Il risultato è che lo studio di questa infestione non ha tratto alcun beneficio dalla rivoluzione biotecnologica che ha condotto a grandissimi progressi nella conoscenza e nel trattamento di altre patologie umane.

Stiamo ora cercando di invertire questa tendenza. I nostri e altri gruppi di ricerca hanno cominciato ad applicare moderni metodi molecolari all'esame dei due principali generi dell'ordine strongiloidei dei nematodi, *Ancylostoma* e *Necator*. Negli ultimi anni il nostro lavoro ha consentito di identificare un buon numero di proteine prodotte da questi parassiti che potrebbero rivelarsi utili come vaccini a scopo profilattico. Una circostanza inattesa e fortunata ha fatto sì che molte di queste proteine si siano dimostrate promettenti come farmaci per patologie cardiovascolari e immunitarie diffuse anche nei paesi industrializzati.

Vi è stata un'epoca in cui gli Stati Uniti e altre nazioni davano un'elevata priorità alle ricerche sui nematodi. La comunità medica si rese conto della potenziale gravità dell'infestazione nel 1880, quando un'epidemia di quella che veniva chiamata anchilostomiasi o anemia del minatore colpì gli operai italiani che scavavano la galleria ferroviaria del San Gottardo, nelle Alpi. Responsabile in quel caso era *A. duodenale*, una delle due specie principali che parassitano l'uomo. Nel 1902 era stata individuata anche la seconda specie, *N. americanus*, ed erano stati identificati molti dettagli del meccanismo di trasmissione da un individuo all'altro. Poco dopo si scoprì che l'infestazione da *N. americanus* era particolarmente diffusa negli Stati Uniti sudorientali. Come risposta, il magnate del petrolio John D. Rockefeller fondò la Rockefeller Sanitary Commission per eradicare la malattia da questa regione e sostenne anche una campagna per combatterla in altri paesi. Questi contributi portarono all'introduzione di nuove terapie e posero le basi dei progressi che si stanno compiendo oggi.

Anche prima dell'interessamento di Rockefeller, tuttavia, si era scoperto che la via di infestazione nell'uomo è piuttosto tortuosa e richiede che le uova e le giovani larve trascorrano un periodo di tempo nel suolo, all'esterno dell'ospite umano. Ogni giorno una femmina adulta libera migliaia di uova fecondate che lasciano il corpo dell'ospite assieme alle feci. Per sopravvivere e crescere, le larve dopo la schiusa hanno bisogno di trovarsi in un terreno caldo, umido e ben aerato, al riparo dalla luce solare. Queste condizioni si trovano principalmente nelle zone rurali dei tropici, soprattutto in luoghi dove le piante coltivate producono esse stesse ombra oppure crescono al riparo di alberi. In queste regioni le infestazioni più gravi (con 100 o più parassiti nell'ospite) si manifestano in persone che vivono in prossimità di colture di cocco, cacao, caffè, tè, canna da zucchero, patata dolce e gelso.

Dopo che le uova sono rimaste nel terreno per un giorno, ne emergono larve microscopiche che si nutrono di residui orga-

I vermi intestinali *Ancylostoma duodenale* (*in questa pagina*) e *Necator americanus* (*nella pagina a fronte*) infestano l'uomo provocando gravi anchilostomiasi. Questi parassiti si nutrono fissandosi alla parete dell'intestino tenue ed estraendo sangue.

I nematodi *A. duodenale* e *N. americanus* sono particolarmente diffusi nelle zone tropicali; spesso solo una delle due specie predomina in una regione, ma in alcune aree possono essere presenti entrambe. La tabella indica le principali caratteristiche dei parassiti. Nell'insieme questi organismi estraggono ogni giorno l'equivalente del sangue contenuto in un milione e mezzo di persone.

CARATTERISTICHE	ANCYLOSTOMA DUODENALE	NECATOR AMERICANUS
Dimensione dell'adulto (la femmina è poco più grande del maschio)	Da 8 a 12 millimetri	Da 5 a 10 millimetri
Uova prodotte ogni giorno da un nematode	Da 10 000 a 30 000	Da 5000 a 10 000
Quantità stimata di sangue estratta ogni giorno da un nematode	0,2 millilitri (una quantità più elevata rende questa specie più virulenta)	0,02 millilitri
Parti boccali	Denti chitinosi	Lamine taglienti
Vita di un adulto	Un anno	Da 3 a 5 anni
Capacità di produrre infestione se ingerito	Sì	No
Capacità delle larve di restare quiescenti nell'ospite	Sì	No

nici e batteri prima di subire due mute e trasformarsi nella forma trasmissibile. In questo stadio le larve non si nutrono, ma si portano invece alla superficie del terreno in attesa di entrare in contatto con un ospite. A questo scopo possono mostrare un comportamento cosiddetto di ricerca: salgono su un filo d'erba o su una piccola zolla, si sollevano sulla coda e ondeggiano.

Tipicamente le larve entrano nel corpo dell'ospite attraverso la cute dei piedi o delle gambe, sebbene anche l'introduzione per via orale di larve di *A. duodenale* possa essere un veicolo di infestazione. Il passaggio attraverso la cute suscita una risposta infiammatoria evidentemente inadeguata, consistente in un accumulo di globuli bianchi nel tessuto interessato. Quale che ne sia la ragione, le cellule di solito non riescono a eliminare i parassiti; intanto, però, l'infiammazione può dare origine a un'intensa irritazione. In effetti, un noto episodio di «irritazione da contatto con il suolo», come è chiamata questa reazione, si ebbe nell'India settentrionale nel 1978, e colpì un gruppo di uomini che praticava un popolare gioco, il *kabaddi*, nel quale si cerca di gettare a terra gli avversari. I giocatori non sapevano che il campo fangoso era contaminato da larve di vermi intestinali, fino a che una fastidiosissima irritazione in tutto il corpo non li costrinse a lasciare precipitosamente il terreno in cerca di sollievo.

Alcuni ricercatori ritengono che il passaggio nell'intestino sia facile per le larve che vengono ingerite, che possono migrare direttamente a destinazione. Le larve che entrano nell'organismo attraverso la cute, viceversa, hanno parecchie difficoltà ad attraversare l'epidermide fino al sottostante derma e ai piccoli vasi del sistema circolatorio o linfatico. Poco dopo essere penetrate in questi vasi, esse sono trasportate dal sangue venoso al lato destro del cuore e ai polmoni. Qui lasciano il circolo per passare nelle vie aeree, dove vengono espulse con la tosse e inghiottite. Nell'intestino tenue le larve, che possono aver cominciato la loro maturazione nella cute, si differenziano infine in maschi e femmine adulti e cominciano ad accoppiarsi e a nutrirsi. Le femmine di solito iniziano a produrre uova entro due mesi dall'ingresso nell'organismo in forma di larve.

Stranamente questo ciclo talvolta si interrompe a metà. Gerhard A. Schad e colleghi dell'Università della Pennsylvania hanno dimostrato che le larve di *A. duodenale* possono rimanere quiescenti per mesi nell'organismo prima di raggiungere l'intestino. Nessuno sa esattamente dove si annidino o come trovino il loro rifugio, ma Keun Tae Lee, Maurice Dale Little e il compianto Paul C. Beaver e colleghi della Tulane University hanno identificato larve di anchilostomi nelle fibre muscolari di animali e di esseri umani. Queste scoperte fanno pensare che il tessuto muscolare possa essere un ricettacolo di larve quiescenti.

Dal punto di vista del verme intestinale, entrare in uno stato quiescente può essere una buona strategia di sopravvivenza. Se le larve maturano durante le stagioni asciutte, le uova prodotte dalle femmine possono venire a trovarsi in un terreno inospitale. Ma se le larve possono in qualche modo regolare il loro arrivo nell'intestino in modo che la produzione delle uova coincida con la stagione umida, queste ultime avranno una probabilità molto maggiore di sopravvivere. Sembra che le larve possiedano davvero una simile capacità sensoriale. Negli anni sessanta, lavorando nel Bengala occidentale, il gruppo di Schad scoprì che lo sviluppo nei tessuti di larve infettive di *A. duodenale* si arresta nei mesi caldi e asciutti dell'anno per poi progredire fino allo stadio adulto e fecondo appena prima della stagione dei monsoni. Così le uova vengono deposte nel terreno umido di cui hanno bisogno.

Il periodo di quiescenza è vantaggioso per gli anchilostomi, ma può essere di grave danno all'ospite. A volte le larve non vengono uccise dai farmaci che eliminano i vermi adulti dall'intestino. Di conseguenza pazienti trattati con apparente successo possono avere una ricaduta alcuni mesi dopo, anche se nel frattempo non sono stati ulteriormente esposti alla possibilità di infestione.

Un altro fatto allarmante è la possibilità, dimostrata in alcuni casi, che larve quiescenti di *A. duodenale* passino nel latte materno, causando così gravi infestazioni nei neonati. Si è già osservato che questo tipo di trasmissione si verifica nei cani. Inoltre Yu Sen-hai e Shen Wei-xia dell'Istituto per le malattie parassitarie di Shanghai hanno identificato di recente neonati gravemente infestati da *A. duodenale*. La possibilità di trasmissione attraverso il latte materno è particolarmente temibile perché i neonati con gravi infestazioni possono diventare fortemente anemici e morire.

Conoscendo il ciclo vitale dei nematodi, abbiamo indipendentemente tentato di identificare le molecole che consentono a questi parassiti di attraversare la cute, maturare e sopravvivere nell'organismo umano; il nostro proposito era di esaminarne il possibile impiego come vaccini. Uno di noi (Hotez) si è concentrato sul genere *Ancylostoma*, che comprende diverse specie; l'altro (Pritchard) si è occupato di *Necator*, la cui specie prevalente è *N. americanus*. Hotez ha prescelto *A. caninum* come rappresentante del suo genere, in quanto questa specie è più facile da trattare in laboratorio rispetto ad *A. duodenale*. Paul Prociv della Università del Queensland in Australia e John Croese del Townsville General Hospital, sempre in Australia, hanno dimostrato recentemente che *A. caninum*, oltre al cane, può parassitare anche l'uomo.

Eravamo particolarmente interessati alla produzione di vaccini soprattutto perché, come abbiamo detto, la disponibilità di farmaci adatti è scarsa in molte parti del mondo, e le larve quiescenti possono generare nuove infestazioni mesi dopo il termine del trattamento. Queste difficoltà sono aggravate dal fatto che le persone colpite una prima volta dall'anchilostomiasi non sembrano acquisire la forte immunità protettiva di cui godono coloro che hanno contratto, per esempio, la varicella. Di conseguenza gli individui che vivono in zone dove i vermi intestinali sono comuni si trovano a essere reinfestati di continuo, e avrebbero bisogno di cicli ripetuti di terapia con farmaci, cosa impossibile per la maggior parte di essi. Inoltre l'uso frequente di farmaci non è la soluzione ideale al problema dei vermi intestinali. I ricercatori dell'Istituto per le malattie parassitarie di Shanghai, che hanno studiato un gran numero di pazienti, hanno scoperto che i farmaci non sono sempre efficaci come si era pensato.

Il migliore metodo di prevenzione, naturalmente, sarebbe il miglioramento delle condizioni igieniche. In effetti, ciò è avvenuto negli Stati Uniti sudorientali dove l'anchilostomiasi è quasi del tutto scomparsa. Tuttavia è improbabile che misure igieniche adeguate vengano prese entro breve tempo in gran parte dei paesi in via di sviluppo, né è verosimile che persone che vivono nel clima caldo dei tropici portino sempre indumenti protettivi nella speranza di ridurre l'esposizione. Al momento, perciò, l'alternativa più logica è la somministrazione in massa di un vaccino progettato per potenziare le difese dell'ospite.

Si possono immaginare due tipi diversi di vaccino. Nell'approccio classico, molecole oppure microrganismi interi, uccisi o inattivati, vengono somministrati per suscitare una risposta immunitaria diretta contro una o più molecole che appaiono alla superficie dei microrganismi. In caso di successo, l'induzione della risposta permette all'organismo di eliminare prontamente l'agente patogeno ogni volta che si presenta.

Anche se l'infestazione naturale da nematodi non sembra in grado di indurre una forte immunità protettiva, la vaccinazione potrebbe ugualmente conferire una efficace protezione. Oltre 30 anni or sono, Thomas A. Miller, allora all'Università di Glasgow, indusse immunità nei cani inoculandoli con larve vive, ma danneggiate da radiazioni, di *A. caninum* nello stadio infestivo. Un vaccino per l'uomo contenente larve vive probabilmente non sarebbe approvato dalle autorità sanitarie. Si potrebbe però replicare il successo di Miller anche in esseri umani somministrando a essi proteine larvali o frammenti proteici ottenuti con l'ingegneria genetica. Un vaccino funzionante impedirebbe alle larve nello stadio infestivo di maturare o di sopravvivere nell'organismo.

Stiamo anche studiando nuovi tipi di vaccini che chiamiamo «vaccini terapeutici». Dato che i vermi intestinali non si moltiplicano nell'ospite, qualunque espediente per ridurre la quantità di sangue che essi estraggono dovrebbe minimizzare il danno prodotto. Riteniamo che, se riuscissimo a individuare molecole che sono secrete dai parassiti, ma non dall'organismo umano, la loro somministrazione potrebbe indurre una risposta immunitaria contro di esse. Questa risposta non ucciderebbe direttamente i parassiti (dato che le sostanze da essi prodotte sono secrete all'esterno del loro organismo), ma potrebbe neutralizzare le secrezioni che consentono ai nematodi di maturare, di assorbire sangue o di sfuggire all'attacco di altre componenti del sistema immunitario.

Nel corso delle nostre ricerche per identificare molecole che potrebbero essere utili per produrre vaccini, abbiamo esaminato gli eventi biochimici che avvengono quando un nematode si fissa alla parete intestinale. Una volta insediatosi, il parassita esegue un'azione di pompaggio con la faringe, risucchiando così una piccola parte della membrana della mucosa e del tessuto sottostante; nello stesso tempo, secerne enzimi capaci di digerire il tessuto.

Alcuni di questi enzimi sono stati identificati nei nostri laboratori e in quello di Paul J. Brindley del Queensland Institute of Medical Research di Brisbane, in Australia. Essi includono proteasi, che degradano le proteine del-

Questo bambino indiano mostrato in un rapporto del 1919 della Rockefeller Foundation Health Board era magro e fragile a causa di un'infestazione cronica da vermi intestinali (*a sinistra*), ma guadagnò peso e massa muscolare dopo che la terapia ebbe eliminato i parassiti (*a destra*). Purtroppo certi effetti potenziali di una infestazione cronica, come la compromissione dello sviluppo intellettivo, sono a volte irreversibili, e la reinfestione è frequente.

l'ospite, e una ialuronidasi, che decompone l'acido ialuronico e altre componenti strutturali della mucosa intestinale. La combinazione di questi attacchi meccanici e chimici non solo estrae dalla parete intestinale sostanze nutritive per il parassita, ma provoca anche la rottura di capillari nella zona interessata. Il nematode consuma parte del sangue che fuoriesce, ma molto va perduto.

L'ospite umano reagisce a questa invasione organizzando una duplice difesa. Una parte di essa consiste nel coagulare il sangue nel sito del danno vascolare, dato che la coagulazione impedisce ulteriori perdite e inibisce l'assorbimento di sangue da parte del parassita. L'altra parte dell'azione difensiva è svolta dal sistema immunitario e comprende l'attivazione dei leucociti, compresi neutrofili ed eosinofili. I leucociti tentano di uccidere i parassiti generando radicali liberi e lipidoidroperossidi, tutte sostanze altamente reattive e distruttive.

La difesa immunitaria implica anche il coinvolgimento di molecole anticorpali che possono agire di concerto con i leucociti. Fra gli anticorpi chiamati in causa vi sono quelli del tipo dell'immunoglobulina E (IgE), le sostanze che intervengono nelle risposte allergiche. Studi recentemente compiuti da Pritchard e colleghi in Papua Nuova Guinea indicano che le reazioni mediate dalla IgE possono essere assai intense in alcuni pazienti (probabilmente quelli più suscettibili alle allergie) e riducono l'assorbimento di sangue da parte dei parassiti; tuttavia non sembra che esse riescano a distruggere in maniera massiccia i nematodi.

I cicli vitali di *A. duodenale* (*frecce rosse*) e di *N. americanus* (*frecce blu*) hanno molti punti in comune. Entrambi iniziano con lo sviluppo delle larve nel suolo (*1-4*). Le larve allo stadio infestivo penetrano generalmente nell'organismo attraverso la pelle (*5*) e seguono un percorso tortuoso prima di raggiungere l'intestino tenue (*6-9*). Qui maturano fino allo stadio adulto e producono uova fecondate che sono deposte nel terreno con gli escrementi (*10 e 11*). Le larve di *A. duodenale* possono penetrare nell'organismo per via orale (*5a*). Sembra che le larve di questa specie seguano anche una via meno diretta (*frecce in rosso chiaro a destra*). Possono rimanere quiescenti nel tessuto muscolare prima di dirigersi verso l'intestino; possono inoltre raggiungere le ghiandole mammarie di una donna gravida e venire trasmesse al neonato con il latte.

Questi parassiti riescono a sopravvivere nell'ospite perché hanno evoluto strategie capaci di neutralizzare le risposte vascolare e immunitaria. Per esempio, essi intralciano l'azione di almeno due componenti del processo di formazione di un coagulo. Quando un piccolo vaso sanguigno viene danneggiato, le cellule della parete secernono una glicoproteina, il fattore tissutale, che si combina con una proteina presente in circolo, il fattore VII. Il complesso risultante dà inizio a una cascata di eventi che culmina nell'attivazione di una terza molecola, un enzima chiamato fattore X. L'enzima attivato (denominato fattore Xa) trasforma a sua volta la protrombina - una proteina - nella forma enzimatica, la trombina, che converte un'ulteriore proteina, il fibrinogeno, in filamenti insolubili di fibrina. Questi ultimi si raccolgono come una rete sulla parete vasale e costituiscono la parte essenziale del coagulo; di solito questa rete ingloba anche piastrine e altre sostanze.

Da quasi un secolo è noto che i nematodi producono un fattore anticoagulante, ma la natura di tale fattore rimaneva misteriosa. Nel nostro laboratorio abbiamo scoperto che una sostanza secreta dai parassiti impedisce in provetta l'aggregazione delle piastrine. Inoltre abbiamo osservato che i vermi intestinali producono una proteina che agisce nelle prime fasi del processo di coagulazione bloccando l'attività del fattore Xa; essa impedisce così tutte le fasi successive. Questa proteina è stata ora isolata da *A. caninum* per merito di Michael Cappello, del gruppo di Hotez, in collaborazione con George P. Vlasuk della CORVAS International di San Diego in California. La molecola, chiamata AcAP (peptide anticoagulante di *A. caninum*), è una proteina piuttosto piccola ed estremamente attiva, mai individuata prima in natura; queste proprietà, come vedremo, implicano che essa possa rivelarsi utile in patologie che non hanno nulla a che fare con l'anchilostomiasi.

La strategia impiegata dagli anchilostomi per sfuggire alla distruzione da parte del sistema immunitario dipende anch'essa dalla sintesi di sostanze chimiche. I ricercatori della CORVAS hanno isolato una di queste sostanze, chiamata fattore di inibizione dei neutrofili, da *A. caninum*. Essa intralcia l'attività di neutrofili ed eosinofili, in parte impedendo loro di secernere sostanze fortemente ossidanti.

Pritchard e il suo collega Peter M. Brophy hanno dimostrato come *N. americanus* abbia evoluto una difesa analoga. Esso secerne enzimi antiossidanti (come la superossidodismutasi e la glutatione-*S*-transferasi) che neutralizzano sostanze quali i radicali liberi. Come ulteriore protezione, *N. americanus* produce un enzima che degrada l'acetilcolina, un neurotrasmettitore liberato dalle cellule nervose della parete intestinale; se questa fosse libera di agire, infatti, attiverebbe i leucociti contro il parassita.

Infine abbiamo scoperto che anche le sostanze utilizzate per decomporre i tessuti intestinali nel sito di fissaggio facilitano la neutralizzazione della risposta immunitaria. Una delle proteasi sintetizzate da *N. americanus* dissolve gli anticorpi, mentre la ialuronidasi prodotta soprattutto da varie specie di *Ancylostoma* promuove la diffusione locale delle varie secrezioni del parassita. Questo fenomeno fa sì che i vermi intestinali siano circondati da uno scudo chimico protettivo.

***A. ceylanicum* è comune in parte dell'Asia, ma è meno diffuso a livello globale di *A. duodenale* e *N. americanus*.**

Per molti aspetti, quindi, il nematode adulto all'interno dell'ospite funziona come un'industria farmaceutica autonoma, che produce molecole adatte a inibire la coagulazione del sangue e la risposta immunitaria dell'organismo ospite. Tuttavia, non solo gli adulti, ma anche le larve sintetizzano composti chimici interessanti. John M. Hawdon del laboratorio di Hotez ha dimostrato, per esempio, che le larve di *A. caninum* nello stadio infestivo producono almeno due proteine: una proteasi che presumibilmente aiuta il microrganismo ad attraversare la cute e un'altra proteina dalla funzione sconosciuta. Questa seconda molecola, chiamata ASP (polipeptide secreto da *Ancylostoma*), potrebbe intervenire nella maturazione allo stadio adulto.

La scoperta che gli anchilostomi sintetizzano molte proteine durante il loro ciclo vitale è entusiasmante per chi tenta di trovare un vaccino. Per esempio, due collaboratori di Hotez, Hawdon e Brian F. Jones, hanno recentemente clonato il gene per la ASP e hanno determinato la sequenza amminoacidica della proteina che esso specifica. Hanno visto così che una parte della molecola è molto simile a un segmento proteico presente nel veleno di alcuni insetti dotati di aculeo. La proteina del veleno induce un'energica risposta immunitaria nell'uomo. Inoltre gli anticorpi che reagiscono al costituente del veleno riconoscono anche la ASP se mescolati a essa in provetta.

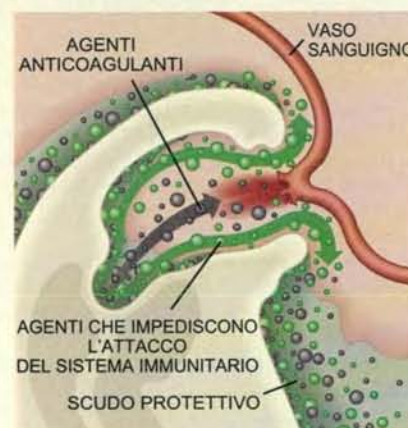
Questi risultati danno motivo di pensare che la ASP possa fungere da vaccino capace di sollecitare una risposta anticorpale tale da distruggere le larve allo stadio infestivo o di impedirne la maturazione. Oggi ne sono disponibili grandi quantità grazie all'ingegneria genetica. Avendo a disposizione una buona scorta del composto, Hotez inizierà presto una collaborazione con i ricercatori dell'Istituto per le malattie parassitarie di Shanghai allo scopo di sperimentarlo come vaccino su animali. Gli altri composti secreti dagli anchilostomi di cui abbiamo parlato prima - in particolare l'AcAP e altri fattori anticoagulanti, gli antiossidanti e il fattore di inibizione dei neutrofili - vengono anch'essi presi in considerazione per la sperimentazione di vaccini.

Studi condotti da Edward A. Munn e colleghi del Babraham Institute in Inghilterra hanno messo in luce un'altra molecola che merita ulteriori indagini. Essi hanno dimostrato che un vaccino consistente in un enzima prodotto da un verme (non un nematode) che si fissa allo stomaco degli ovini può proteggere questi animali da ulteriori infestazioni da parte del parassita. Pritchard e colleghi hanno osservato che *N. americanus* produce un enzima simile, il che fa pensare che l'inoculazione di questa sostanza possa indurre una risposta protettiva anche nell'uomo.

Idee per nuovi vaccini potrebbero scaturire anche dalle indagini che si concentrano sui determinanti genetici della suscettibilità all'infestione da anchilostomi. Parecchi anni fa Schad e Roy M. Anderson, che oggi lavora all'Università di Oxford, hanno notato che le persone che sono infestate gravemente una prima volta tendono a essere reinfestate in maniera altrettanto grave, mentre coloro che hanno avuto una infestazione di lieve entità continuano a riacquisire infestioni lievi. Vi sono alcune indicazioni che questo andamento sia determinato dalla costituzione genetica dell'ospite. Se le cose stanno così, l'identificazione dei geni che influenzano la suscettibilità fornirebbe ulteriori elementi utili per prevenire le infestazioni più gravi. Le ricerche di Pritchard in Papua Nuova Guinea indicano che i geni che predispongono all'allergia sono un obiettivo di ricerca particolarmente promettente.

Queste prospettive sono senza dubbio entusiasmanti, ma resta un ostacolo molto grave alla produzione di vaccini. Le industrie farmaceutiche sono riluttanti a investire in vaccini per il Terzo Mondo, perché la mancanza di un ricco mercato implica che i produttori non potranno recuperare i costi (si veda l'articolo *Meglio prevenire* di Tim Beardsley in «Le Scienze» n. 321, maggio 1995). A meno di trovare ingenti finanziamenti, la messa a punto di un vaccino contro l'anchilostomiasi potrebbe languire.

Per ironia della sorte, le proteine finora identificate prodotte da questi nematodi potrebbero trovare la loro prima

I parassiti adulti che si sono insediati nell'intestino tenue risucchiano gli strati superficiali della parete intestinale e ne danneggiano tessuti e vasi sanguigni per nutrirsi. Essi si garantiscono un apporto costante di sangue e si proteggono dall'attacco immunitario secernendo molte sostanze chimiche, alcune delle quali sono elencate in tabella. I composti prodotti dagli adulti e dalle larve potranno un giorno servire come vaccini per l'anchilostomiasi o come terapie per malattie cardiovascolari e immunitarie. Il parassita visibile nella microfotografia è stato rinvenuto in seguito all'autopsia di un neonato morto per una infestazione non diagnosticata.

	SOSTANZA	FUNZIONE
SOSTANZE CHE BLOCCANO LA COAGULAZIONE	Peptide anticoagulante (in *Ancylostoma*)	Inibisce l'attività di un enzima fondamentale per la coagulazione ematica
	Inibitore dell'aggregazione delle piastrine (in *Ancylostoma, Necator*)	Impedisce alle piastrine di facilitare la formazione di coaguli
SOSTANZE CHE IMPEDISCONO L'ATTACCO IMMUNITARIO	Superossidodismutasi (in *Necator*)	Antiossidante; neutralizza gli agenti ossidanti distruttivi secreti dalle cellule immunitarie
	Glutatione-*S*-transferasi (in *Necator*)	Antiossidante
	Enzima che degrada gli anticorpi (in *Necator*)	Impedisce agli anticorpi di partecipare alla risposta immunitaria
	Acetilcolinesterasi (in *Necator*)	Decompone l'acetilcolina che può indurre le cellule immunitarie ad attaccare i parassiti
	Fattore di inibizione dei neutrofili (in *Ancylostoma*)	Impedisce alle cellule immunitarie di secernere agenti ossidanti
	Ialuronidasi (in *Ancylostoma*)	Facilita la diffusione locale di altre sostanze secrete dai parassiti

applicazione non come vaccini, ma come farmaci per patologie non correlate alla parassitosi. Un esempio è l'agente anticoagulante AcAP, che potrebbe rivelarsi utile nelle cardiopatie.

Come è già stato detto, l'AcAP interferisce con l'attività del fattore Xa, che ha un ruolo fondamentale nella serie di reazioni che portano alla coagulazione del sangue nell'intestino. Sembra che il fattore Xa sia importante anche nella formazione dei trombi che spesso provocano ischemie miocardiche. Questi fatti, insieme con l'unicità strutturale dell'AcAP, implicano che la molecola possa trovare impiego in alternativa agli attuali agenti anticoagulanti in alcuni pazienti affetti da patologie cardiovascolari. Per esempio, l'AcAP potrebbe essere prezioso per impedire una nuova occlusione delle arterie sottoposte ad angioplastica (l'allargamento di un vaso occluso per mezzo di un «palloncino»).

Il fattore di inibizione dei neutrofili e altre sostanze capaci di bloccare la risposta immunitaria sono promettenti per il trattamento di patologie diffuse nei paesi industrializzati. Sono in corso studi per determinare se sia opportuno cercare di impiegarli come terapie per malattie autoimmuni, rigetto di trapianti e asma o altre allergie.

La possibilità che le molecole sintetizzate dagli anchilostomi possano avere svariate applicazioni è confortante, ma l'impiego terapeutico nei paesi industrializzati non è la nostra priorità principale. Noi speriamo sempre di poter trovare un modo per debellare l'infestione.

Nel 1911 C. L. Pridgen, un medico della Columbus County nel North Carolina, descrisse le terribili condizioni di un ragazzo quindicenne gravemente infestato. Nel Secondo rapporto annuale della Rockefeller Sanitary Commission, Pridgen scrisse:

«Il ragazzo era un soggetto tipico. La sua pelle aveva aspetto cadaverico... Sembrava non notare affatto la folla... e si assoggettò alla visita medica con la più totale indifferenza. Quando l'esame fu terminato si voltò subito, senza aspettare di udire la diagnosi, e andò a sedersi su un ceppo lì vicino, evidentemente molto affaticato... [Il padre] disse che il ragazzo era sempre stato un buono a nulla... sedeva sulla veranda come un cane, sempre apatico giorno dopo giorno. Non si riusciva a indurlo né a lavorare né a giocare».

Dopo la terapia le condizioni del ragazzo migliorarono grandemente. Pridgen riporta le parole del padre: «Quando sono uscito di casa, stava guidando l'aratro e urlava tanto al mulo che si capiva che era contento di vivere».

Vi sono buone probabilità, tuttavia, che in seguito egli si sia reinfestato e sia divenuto nuovamente letargico. Se fosse vissuto nel Terzo Mondo, probabilmente non avrebbe avuto la possibilità di essere curato ogni volta che ne aveva bisogno. Speriamo un giorno di poter produrre un semplice vaccino capace di prevenire una simile letargia - e conseguenze ancora peggiori - in milioni di bambini di tutto il mondo.

PETER J. HOTEZ è professore associato di pediatria ed epidemiologia e direttore del Laboratorio di elmintologia medica presso la Yale University School of Medicine.

DAVID I. PRITCHARD è lettore in scienze biologiche all'Università di Nottingham, in Inghilterra; in precedenza ha lavorato nell'industria farmaceutica.

SCHAD G. A. e WARREN K. S. (a cura), *Hookworm Disease: Current Status and New Directions*, Taylor and Francis, 1990.

BROPHY P. M. e PRITCHARD D. I., *Immunity to Helminths: Ready to Tip the Biochemical Balance* in «Parasitology Today», 8, n. 12, 1992.

DESPOMMIER D., GWADZ R. e HOTEZ P. J., *Parasitic Diseases*, terza edizione, Springer-Verlag, 1995.

HOTEZ P. J., HAWDON J., CAPPELLO M., JONES B. e PRITCHARD D. L., *Molecular Pathobiology of Hookworm Infection* in «Infectious Agents and Disease», 4, n. 2, giugno 1995.

Aloni nucleari

Alcuni nuclei dotati di neutroni o protoni in eccedenza si collocano ai limiti della stabilità nucleare, e in queste condizioni «estreme» sono circondati da un alone

di Sam M. Austin e George F. Bertsch

Durante l'ultimo mezzo secolo, i fisici hanno raffigurato il nucleo atomico - formato da protoni e neutroni - come una goccia di liquido dotata di una superficie ben definita. Ma non è sempre così. Oggi le ricerche condotte in diversi laboratori testimoniano l'esistenza di una struttura del tutto nuova: in certi nuclei, una parte dei neutroni e dei protoni si spinge oltre la superficie della goccia e forma un «alone», proprio come gli elettroni generano la nube elettronica che circonda i nuclei nella struttura atomica. Non è sorprendente che questi nuclei estesi si comportino in modo molto differente rispetto a quelli normali. Questi ultimi, infatti, sono difficili da eccitare o da rompere, mentre i nuclei dotati di alone sono oggetti fragili. Hanno dimensioni più grandi dei nuclei normali e interagiscono molto facilmente con essi. Di fatto, l'alone è un fenomeno quantistico che non obbedisce alle leggi della fisica classica, e per questa ragione i nuclei con alone possono offrire nuove informazioni su uno dei misteri principali della fisica: il legame nucleare.

In effetti i fisici hanno cercato a lungo e invano di determinare quali siano le combinazioni di protoni e neutroni (detti collettivamente nucleoni) che possono legarsi in un nucleo. La risposta dipende in modo critico dal numero di neutroni e protoni coinvolti e dalle forze che si sviluppano tra essi. Tutti i nucleoni si attraggono, ma solo dalla combinazione di un neutrone e di un protone si possono formare coppie, dette deuteroni. Di conseguenza, solo quei nuclei che contengono approssimativamente lo stesso numero di neutroni e di protoni sono abbastanza stabili da comporre gli elementi che si trovano in natura.

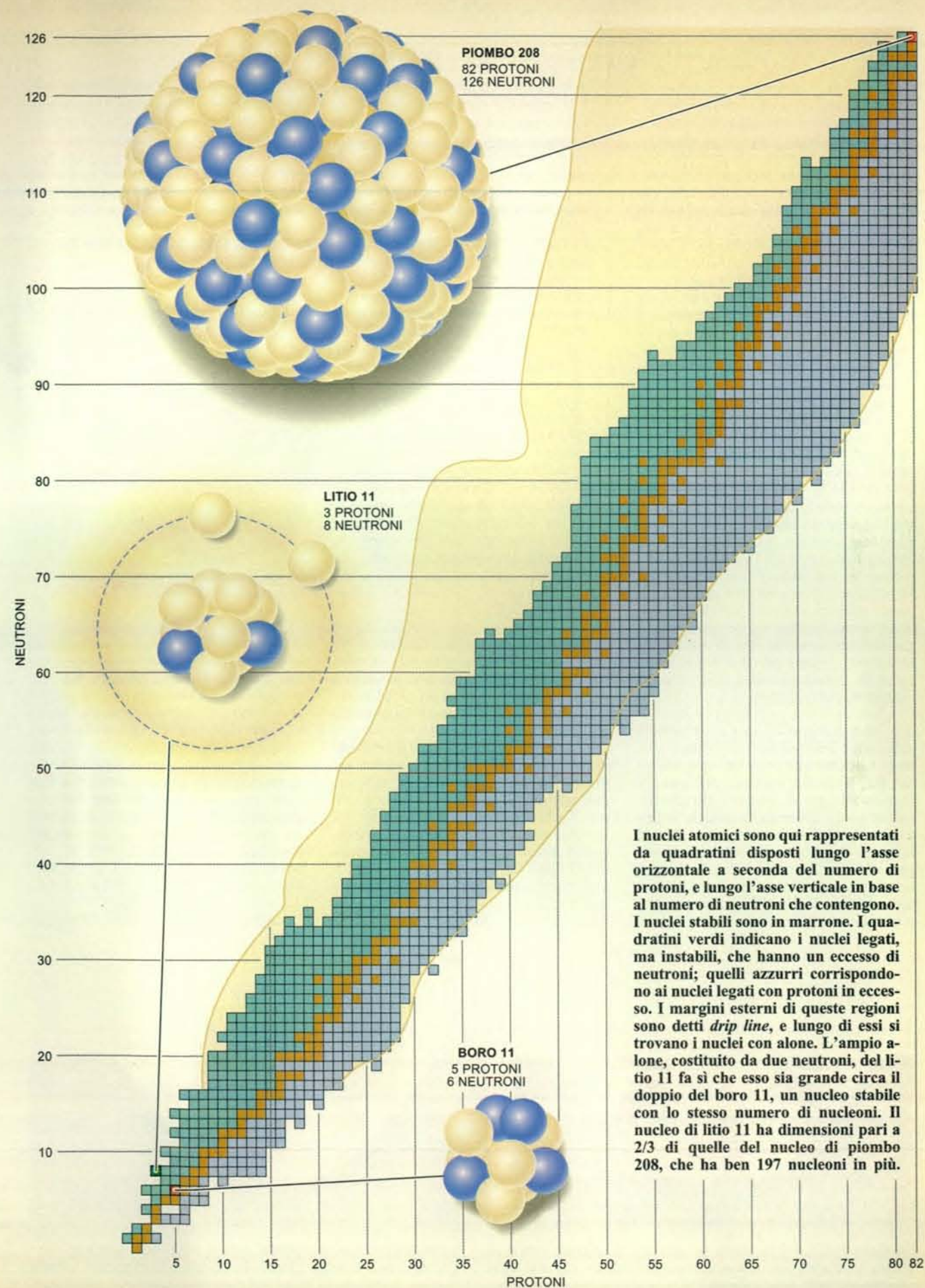
Esistono anche nuclei che contengono un numero diverso di neutroni e di protoni, ma hanno vita media limitata. Sebbene siano legati - ovvero occorre energia per liberarne un nucleone - questi nuclei non sono stabili. La radioattività, e in particolare l'emissione beta, può mutarli in specie più stabili, con la trasformazione di alcuni neutroni in protoni o viceversa. Alcune di queste transizioni hanno luogo in pochi millisecondi, mentre altre richiedono milioni di anni. In generale, però, se i nuclei vengono disposti in un grafico, dove un asse riporta il numero dei neutroni e l'altro il numero dei protoni, quelli lontani dalla diagonale hanno vita media breve.

A una certa distanza dalla diagonale - sia sopra sia sotto di essa - i nuclei si spezzano altrettanto velocemente di quanto si formino. Al di là di questi limiti, denominati *drip line*, non possono esistere nuclei realmente legati. I nuclei più esotici sono quelli che giacciono appena all'interno delle drip line, ai margini della stabilità nucleare. Questi sistemi «estremi» compaiono solo in ambienti molto più ostili del nostro e sono il risultato di quelle reazioni che hanno sintetizzato gli elementi pesanti dell'universo e che oggi si verificano solo nelle potenti esplosioni stellari di nova e supernova nonché negli oggetti che emettono impulsi di radiazione X. Secondo alcune ipotesi, nuclei situati lungo la drip line inferiore si troverebbero nella crosta delle stelle di neutroni.

Esistevano ben pochi mezzi per studiare questi nuclei fino a una decina di anni fa, quando Isao Tanihata e colleghi, del Lawrence Berkeley Laboratory, misero a punto una tecnica per studiare come i nuclei instabili interagiscano con altri nuclei. Questo metodo ha condotto alla scoperta di aloni in una grande varietà di nuclei. Finora il nucleo con alone più studiato è un isotopo del litio, Li-11, che ha tre protoni e otto neutroni. Le analisi della sua effimera struttura hanno rivelato numerosi segreti sulla sorprendente natura degli aloni.

I ricercatori del Lawrence Berkeley Laboratory scoprirono il litio 11 nel 1966, ma la sua insolita struttura non fu chiara fino ad almeno dieci anni più tardi. Nel 1985 Tanihata cercò di misurarne le dimensioni facendo collidere nuclei normali di elevata energia per produrre un fascio di isotopi instabili in un processo di frammentazione. Poi dispose una lamina di carbonio sulla traiettoria del fascio e contò quanti nuclei rimanessero intatti nell'attraversamento della lamina. Questo numero è legato alla probabilità che i nuclei del fascio interagiscano con i nuclei della lamina, probabilità che si esprime con la cosiddetta sezione d'urto. Tanihata scoprì che i nuclei di litio 11 hanno una sezione d'urto particolarmente grande. La sua interpretazione fu che i nuclei di litio 11 recano aloni: due dei loro neutroni sono legati così debolmente che si spingono ben oltre i confini del nucleo, dove possono facilmente essere strappati via nell'impatto con la lamina.

Fu una scoperta stupefacente. Secondo le leggi della fisica classica, una particella legata deve stare entro la portata delle forze nucleari, ma in meccanica quantistica l'effetto tunnel rende possibile l'esistenza di aloni. Per visualizzare questo fenomeno immaginiamo un ragazzo su uno *skateboard* in un percorso a forma di canale. L'energia totale del ragazzo determina la distanza che può percorrere: quanto maggiore è l'energia, tanto più in alto egli può salire, anche se non può superare il limite imposto dall'energia che spende nel suo movimento. In meccanica quantistica il confinamento non è così rigoroso; anche il ragazzo più pigro può occasionalmente uscire dal canale. Il tempo che può trascorrere all'esterno è limitato, ed è legato - secondo il principio di indeterminazione di Heisenberg - all'energia addizionale che gli occorre per balzar fuori. Quanto più bassa è questa energia, tanto maggiore è il tempo trascorso fuori dal canale.

Per un oggetto delle dimensioni di una persona su uno skateboard, la probabilità che si abbia effetto tunnel è inimmaginabilmente bassa, ma alla sca-

I nuclei atomici sono qui rappresentati da quadratini disposti lungo l'asse orizzontale a seconda del numero di protoni, e lungo l'asse verticale in base al numero di neutroni che contengono. I nuclei stabili sono in marrone. I quadratini verdi indicano i nuclei legati, ma instabili, che hanno un eccesso di neutroni; quelli azzurri corrispondono ai nuclei legati con protoni in eccesso. I margini esterni di queste regioni sono detti *drip line*, e lungo di essi si trovano i nuclei con alone. L'ampio alone, costituito da due neutroni, del litio 11 fa sì che esso sia grande circa il doppio del boro 11, un nucleo stabile con lo stesso numero di nucleoni. Il nucleo di litio 11 ha dimensioni pari a 2/3 di quelle del nucleo di piombo 208, che ha ben 197 nucleoni in più.

la atomica e nucleare il fenomeno può essere significativo. Come ha osservato Tanihata, nel litio 11 l'effetto è vistosissimo. I due neutroni più esterni sono legati soltanto da poche centinaia di migliaia di elettronvolt, oltre un ordine di grandezza in meno rispetto alla normale energia di legame. Di conseguenza occorre pochissima energia perché questi neutroni vengano portati lontano dal nucleo, dove possono rimanere per un tempo relativamente lungo, formando un tenue alone espanso. In effetti la distanza media dell'alone del litio 11 dal nucleo misura circa 5 femtometri (10^{-15} metri), più del doppio di quella di un nucleo normale della stessa massa.

Ulteriori studi hanno rivelato che il nucleo di litio 11 è decisamente insolito anche sotto altri aspetti. L'isotopo Li-10, che conterrebbe un neutrone in meno, non è legato: tre protoni e sette neutroni non rimangono legati a formare un nucleo. Se si toglie un neutrone al nucleo di litio 11, se ne libera immediatamente un secondo, lasciando un nucleo di litio 9. Perciò il litio 9 e i due neutroni sono legati come un sistema a tre corpi che si sfascia se uno dei corpi viene asportato. Per questa ragione Mikhail Zhukov dell'Università di Göteborg ha chiamato il litio 11 «nucleo borromeo», in quanto somiglia al simbolo araldico della casata dei Borromeo, il cui stemma ha tre anelli allacciati tra loro in modo che, se uno dei tre viene tolto, anche gli altri due si separano. Si conoscono altri cinque o sei esempi di nuclei borromei.

Rainer Neugart e i suoi collaboratori del CERN di Ginevra hanno studiato l'interazione fra i tre componenti del litio 11 (i due neutroni dell'alone e il nucleo di litio 9), esaminando specificamente se l'alone abbia qualche effetto sul nucleo. Essi hanno brillantemente misurato le proprietà elettriche e magnetiche dell'isotopo e hanno così verificato che coincidono con quelle del nucleo di litio 9. Poiché i neutroni che costituiscono l'alone non sono dotati di carica elettrica - e considerati come coppia non hanno né spin né momento magnetico - questo risultato conferma l'ipotesi che il nucleo di litio 9 e l'alone nucleare con i suoi due neutroni siano oggetti quasi indipendenti.

Come ottenere nuclei esotici

Nell'ultimo decennio, gli sperimentatori hanno sviluppato due metodi fondamentalmente diversi per studiare i nuclei con alone. Alcuni analizzano i frammenti dei nuclei bersaglio, mentre altri esaminano i frammenti dei proiettili che bombardano il bersaglio. Con la prima strategia, gli isotopi che interessano devono essere estratti dal materiale del bersaglio. Se un elemento è volatile, quando il bersaglio viene riscaldato i suoi isotopi si diffondono e possono poi essere ionizzati e separati. Questa tecnica prende il nome di ISOL (*isotope separation on line*). La vita media del litio 11 è stata misurata per la prima volta mediante ISOLDE, il laboratorio di tipo ISOL del CERN. Sono attualmente in costruzione nuove apparecchiature destinate a queste misurazioni allo Oak Ridge National Laboratory, in Tennessee, e in altri laboratori di tutto il mondo.

Nell'altra strategia, l'urto con il bersaglio disintegra i nuclei proiettile in frammenti che si muovono alla stessa elevata velocità del proiettile stesso. Si studiano poi i frammenti che presentano proprietà insolite. Paradossalmente, l'alta velocità del fascio facilita lo studio di molti nuclei, specialmente di isotopi a vita molto breve come il litio 11 (il cui tempo di dimezzamento è di soli 9 millisecondi). In alcuni laboratori - tra i quali il GANIL a Caen, in Francia, l'NSCL alla Michigan State University, il RIKEN presso Tokyo e il GSI a Darmstadt, in Germania - si sono costruite apparecchiature di questo tipo per lavorare con fasci radioattivi e per studiare nuclei instabili.

Nel 1990 Bradley M. Sherrill e i suoi colleghi hanno costruito il separatore di frammenti A1200 della Michigan State University. Questo dispositivo filtra i nuclei esotici sottoponendo il fascio di frammenti a diverse forze (*nell'illustrazione*). Magneti di dipolo curvano il fascio in base alle quantità di moto e alle cariche dei nuclei in esso presenti; doppietti e tripletti di magneti di quadrupolo focalizzano il fascio.

Quest'ultimo può anche essere fatto passare attraverso una lastrina sottile che rallenta i nuclei in modo differenziato a seconda della loro velocità e della loro carica. Inoltre il fascio può essere inviato a un filtro di Wien, un dispositivo che genera campi magnetici e un campo elettrico trasversale. Infine, è talora possibile misurare il tempo che un nucleo impiega per attraversare il separatore, il che fornisce un'altra misura della sua velocità. Grazie a tutte queste informazioni, è stato possibile identificare singoli nuclei che sono passati attraverso il dispositivo e misurarne la velocità e la quantità di moto.

Una volta ottenuta questa informazione, gli sperimentatori hanno cercato di stabilire come fossero disposti i singoli nucleoni del litio 11. A questo scopo, Toshio Kobayashi e colleghi del Lawrence Berkeley Laboratory hanno esaminato la distribuzione della quantità di moto dei nuclei di litio 11. Il moto di questi ultimi, retto dalle leggi della meccanica quantistica, soddisfa un'altra relazione derivante dal principio di indeterminazione di Heisenberg, secondo la quale le particelle non possono avere una quantità di moto precisa, ma possiedono invece un intervallo di quantità di moto che dipende dalla loro distribuzione nello spazio, legata alla forma della funzione d'onda. Più è estesa e piana la funzione d'onda, più definita è la quantità di moto della particella. Così, se un alone è di grandi dimensioni e una particella del bersaglio lo separa dal suo nucleo, le quantità di moto dei neutroni separati differiscono di poco dai loro valori iniziali. Le particelle proseguiranno pressoché in linea retta e quasi con la stessa velocità.

Kobayashi e il suo gruppo hanno seguito un approccio indiretto per determinare la quantità di moto dell'alone, producendo reazioni in cui i neutroni dell'alone venivano strappati al nucleo di litio 11 e osservando poi il moto del nucleo di litio 9. Poiché la quantità di moto iniziale del nucleo di litio 11 è fissata, l'intervallo di quantità di moto associato al nucleo deve corrispondere a quello associato ai neutroni. Grazie a questa relazione si è visto che la distribuzione della quantità di moto era assai stretta, pari a circa un quinto di quella misurata nella rottura di nuclei normali.

La fisica classica e la fisica quantistica sono confrontate in queste immagini servendosi dell'esempio di un ragazzo sullo *skateboard*. Nella teoria classica il ragazzo raggiunge un'altezza definita su ciascun lato del canale, a seconda della sua energia. Secondo le leggi quantistiche, egli può superare i limiti imposti dall'energia, come indicato dalle immagini più chiare.

Successivi esperimenti diretti da Alex C. Mueller presso il GANIL a Caen, in Normandia, hanno permesso di misurare la deflessione dei neutroni stessi, anziché quella del nucleo. In queste condizioni i neutroni dell'alone proseguivano il loro moto entro un cono dell'ampiezza di circa due gradi, mentre i neutroni di nuclei normali si disperdono in un cono di 10 gradi. Purtroppo è stato difficile interpretare quantitativamente questi esperimenti perché anche le forze elastiche prodotte dal bersaglio influiscono sul moto.

Un gruppo della Michigan State University, composto da Bradley M. Sherrill, Nigel A. Orr e uno di noi (Austin), ha scoperto un modo per aggirare questa limitazione. Le forze elastiche deflettono le particelle soprattutto in direzione laterale, mentre la componente della quantità di moto parallela alla direzione del fascio è poco influenzata. Ci rendevamo conto che l'influenza dell'alone sarebbe stata più chiara se avessimo potuto misurare la distribuzione della quantità di moto in questa direzione, ma il fascio di litio 11 che stavamo utilizzando aveva una distribuzione di quantità di moto dieci volte più ampia dell'effetto da misurare. Fortunatamente il separatore di frammenti A1200 dell'Università consente di disperdere il fascio e di focalizzare le particelle su piccole aree in base alla variazione della loro quantità di moto anziché alla quantità di moto finale. In questo modo il separatore può selezionare le variazioni di quantità di moto causate dalla rottura del nucleo.

Impiegando questa tecnica, il gruppo della Michigan State University ha ottenuto una risoluzione molto inferiore all'ampiezza della distribuzione di quantità di moto che si desiderava misurare. Un fascio di litio 11 fu fatto incidere su una varietà di bersagli, la cui massa andava dal berillio all'uranio, posti uno per volta al centro del dispositivo. I nuclei di litio 9 risultanti dalla frammentazione del litio 11 avevano una distribuzione della quantità di moto stretta e pressoché indipendente dalla massa atomica del bersaglio. Poiché per bersagli leggeri la frammentazione è mediata dalle interazioni nucleari, mentre quelle elettriche prevalgono nel caso di bersagli pesanti, ne concludemmo che il risultato era indipendente dal meccanismo di reazione e rispecchiava direttamente la struttura dell'alone. Questi dati indicavano che il raggio dell'alone nucleare del litio 11 era oltre il doppio di quello del nucleo.

Mentre si svolgevano questi esperimenti, i teorici stavano cercando di comprendere il singolare comportamento del litio 11. Si trovavano di fronte a due seri ostacoli, che tuttora non sono stati superati. Innanzitutto, le forze tra i nucleoni non sono note con precisione sufficiente a prevedere le sottili proprietà di legame dei nuclei con alone. In secondo luogo, anche se queste forze fossero conosciute, i calcolatori attuali non hanno la velocità o la memoria necessarie per risolvere il sistema di equazioni differenziali quantomeccaniche per 11 nucleoni interagenti. Ciò nondimeno, si sono sviluppati modelli semplificati che presentano i principali attributi fisici dei nuclei con alone.

Una caratteristica che si cerca di rappresentare in questi modelli è il ruolo della formazione di coppie in sistemi con molti nucleoni. In generale, l'interazione che dà luogo alla formazione di coppie è l'attrazione tra le particelle meno legate di un sistema e può influire radicalmente sulle proprietà del sistema stesso. Nei metalli, per esempio, la formazione di coppie di elettroni è la causa della superconduttività. L'interazione di accoppiamento è di importanza basilare in quasi tutti gli aspetti della struttura nucleare: essa determina quali nuclei siano stabili e favorisce processi come la fissione nucleare. La formazione di coppie in un gas rarefatto di neutroni influenza le proprietà delle stelle di neutroni, che dipendono dalla superfluidità del gas medesimo. Infine, l'accoppiamento provoca il comportamento dei nuclei borromei.

È stata sviluppata un'ampia gamma di utili modelli, basati su ipotesi molto diverse riguardo all'accoppiamento. P. Gregers Hansen dell'Università di Aarhus, in Danimarca, e Björn Jonson della Chalmers University of Technology, in Svezia, hanno proposto un semplice modello nel 1988 assumendo che l'accoppiamento tra i due neutroni esterni del litio 11 sia così forte che questi nucleoni possono essere trattati come una singola particella, il dineutrone.

Il moto di questa particella nel campo del nucleo di litio 9 è un problema a due corpi, relativamente facile da risolvere. In effetti, se il legame è debole - tanto che le due particelle abbiano scarsa probabilità di interagire - la funzione d'onda si può trovare in un libro di testo. Con questa approssimazione, Hansen e Jonson hanno ricavato formule per la dimensione dell'alone, per la probabilità di disintegrazione del nucleo nel campo elettrico prodotto da un bersaglio di carica elevata e per l'energia del dineutrone dopo la frammentazione. Con un modello così semplice, tuttavia, non si può calcolare l'energia di legame dell'alone nucleare.

Quando era ancora un laureando alla

Michigan State University, James Foxwell studiò un altro modello estremo sotto la guida di uno di noi (Bertsch). Al contrario della teoria del dineutrone, il modello di Foxwell ignora completamente la formazione di coppie di neutroni, assumendo che ciascuno dei due neutroni dell'alone sia legato indipendentemente al nucleo. Si risolve quindi un problema a due corpi per un neutrone alla volta. Foxwell ha calcolato la probabilità di disintegrazione e l'energia del sistema eccitato. Come quello di Hansen-Jonson, il modello di Foxwell richiede che l'energia di legame sia nota a priori. Il fatto interessante è che due tecniche così differenti hanno dato previsioni simili sulla fragilità del litio 11, discostandosi soltanto di un fattore due nel calcolo della sezione d'urto.

Da allora, i teorici hanno costruito modelli più sofisticati, che incorporano esplicitamente le forze che provocano la formazione di coppie. Poiché il problema a tre corpi in meccanica quantistica è ora trattabile numericamente con potenti calcolatori, è realistico considerare il litio 11 come un sistema di tre particelle. Henning Esbensen dell'Argonne National Laboratory ha calcolato la funzione d'onda del litio 11 mediante una descrizione realistica dell'interazione tra i neutroni e il nucleo di litio 9 e una trattazione più approssimata della forza di accoppiamento. La sua funzione d'onda mostra che, quando i neutroni si trovano nelle zone esterne dell'alone, hanno un'elevata probabilità di essere vicini fra loro. D'altra parte, quando sono nei pressi del nucleo, tendono a distanziarsi fra loro.

La meccanica quantistica reale della formazione di coppie descrive perciò un comportamento che si situa tra i limiti dei due modelli estremi. Il calcolo della sezione d'urto ha dato valori a mezza via tra quelli previsti dai due modelli e in accordo con i risultati sperimentali. Come spesso accade in fisica nucleare, possono essere validi modelli molto diversi, e i loro dominî di validità possono persino sovrapporsi. Il modello a tre corpi ha consentito inoltre di prevedere in maniera davvero soddisfacente la distribuzione della quantità di moto nella disintegrazione del litio 11 osservata nei laboratori della Michigan State University.

Ian Thompson e collaboratori dell'Università del Surrey hanno eseguito calcoli simili. Questo gruppo ha utilizzato un modello più realistico dell'interazione tra i neutroni, ma ha trattato in modo più approssimativo quella tra i neutroni e il nucleo. Ha anche verificato che il litio 11 è un nucleo borromeo e ha un vasto alone. Questi risultati convincenti hanno rafforzato la nostra convinzione di aver ormai compreso l'accoppiamento tra neutroni in un sistema a bassa densità, quale potrebbe esistere nella crosta di una stella di neutroni.

Ora che è stato scoperto e studiato un nuovo aspetto del comportamento nucleare, viene spontaneo chiedersi in che direzione procedere. È evidente che gli aloni influenzano molte reazioni nucleari. Per esempio, si sta progettando di misurare le reazioni tra litio 11 e protoni per valutare la probabilità che un protone strappi due neutroni al litio formando un nucleo di trizio. La correlazione tra i neutroni influenza direttamente questa probabilità perché i due neutroni devono essere molto vicini tra loro per combinarsi con il protone incidente. Analizzando simili reazioni, saremo in grado di ottenere una misura diretta di questa correlazione.

Gli esperimenti svolti da Karsten Riisager e dai suoi collaboratori presso il CERN hanno dimostrato che i nuclei con alone manifestano proprietà uniche quando si disintegrano per decadimento beta. È stato osservato il nucleo borromeo dell'elio 6, che ha due protoni e quattro neutroni; quando questo nucleo subisce decadimento beta, uno dei neutroni del suo alone può trasformarsi in un protone. Normalmente questo protone resterebbe legato al nucleo, ma nell'elio 6 può combinarsi con il rimanente neutrone dell'alone e sfuggire sotto forma di nucleo di deuterio.

Ancora più importante sarà lo studio degli aloni di nuclei più pesanti. Finora le ricerche si sono concentrate su due nuclei, il litio 11 e il berillio 11, che si possono produrre e isolare abbastanza facilmente. Si stanno progettando nuovi dispositivi per ottenere sistemi più pesanti, ma si è già cominciato, con le apparecchiature disponibili, a studiare nuclei dotati di alone con massa atomica pari a circa 20. Alcuni stanno esaminando il nucleo borromeo del berillio 14. Ricercatori della Michigan State University hanno misurato la distribuzione della quantità di moto di un isotopo del carbonio, C-19, che ha sette neutroni in più rispetto all'isotopo più stabile, C-12; altri, al GANIL, hanno scoperto C-22, che ha ancora tre neutroni in più.

I teorici stanno anche cominciando a studiare le proprietà di nuclei situati sulle drip line che hanno più di due neutroni nell'alone. In questi sistemi gli aspetti dell'accoppiamento a molte particelle diventano particolarmente significativi. Nei nuclei borromei questi aloni possono essere molto più grandi di quelli osservati nel litio 11. Vitalij Efimov dell'Università di Washington ha previsto questo fenomeno e ha dimostrato che, quando l'interazione tra le particelle in un sistema a tre corpi è quasi forte a sufficienza da legarle due alla volta, il sistema può avere molti stati di alone estesi, anzi un numero potenzialmente infinito di stati diversi.

Infine anche protoni debolmente legati possono dare origine ad aloni nucleari. Forse l'esempio migliore è un isotopo del boro, B-8, che ha un protone legato assai debolmente. Questo protone è ancor meno legato dei neutroni del litio 11 e il suo alone è molto probabilmente non sferico. Per determinare le caratteristiche dell'alone del boro 8, diversi gruppi stanno tentando di misurare la distribuzione della quantità di moto del nucleo in direzione parallela al fascio.

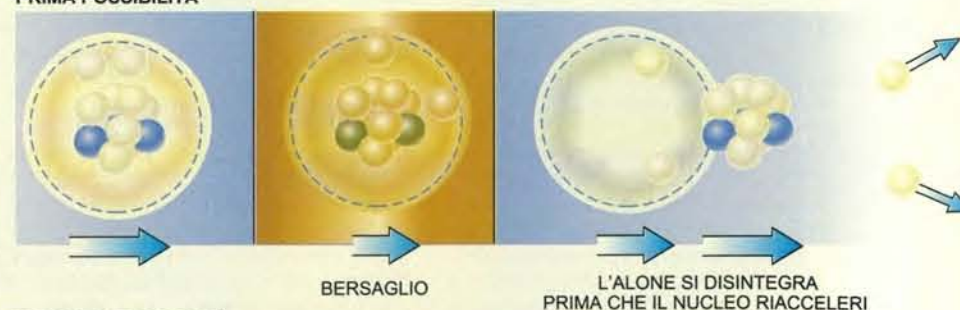
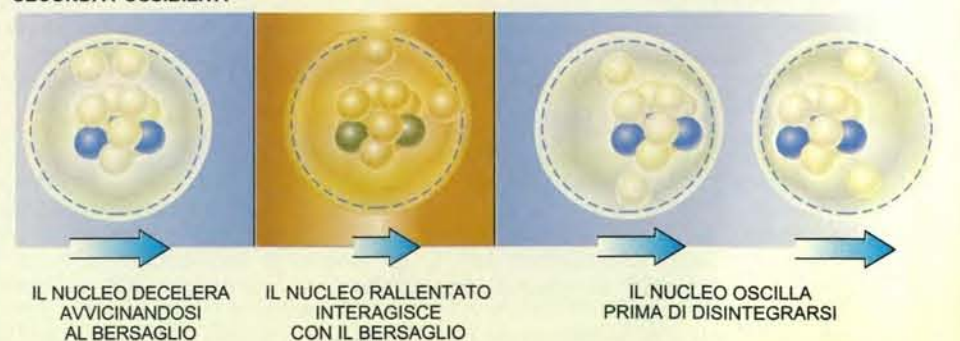
Gli astrofisici sono particolarmente interessati al boro 8 perché nel Sole questo isotopo produce neutrini facilmente rivelabili. Vi è però una grave anomalia, perché il numero dei neutrini osservati provenienti dal decadimento beta del boro 8 nel Sole è molto inferiore alle previsioni. La conoscenza dell'esatta natura di questo nucleo potrebbe offrire la chiave per risolvere questo enigma. Lo studio dei nuclei prossimi alle drip line produrrà certamente nuove sorprese, ma già le ricerche sugli aloni ci hanno rivelato qualcosa di ciò che succede ai limiti estremi della stabilità nucleare.

Come si misura il momento elettrico e magnetico

Rainer Neugart e collaboratori del CERN hanno confrontato le proprietà elettriche e magnetiche degli isotopi 9 e 11 del litio con uno speciale dispositivo. Un campo elettrico deflette gli ioni provenienti dal separatore ISOLDE lungo un tubo e attraverso un gas, dove vengono neutralizzati. Il fascio è «bagnato» in luce laser polarizzata per allineare gli spin degli atomi; poi questi vengono fermati in un cristallo. Un campo magnetico che circonda questa parte dell'apparecchiatura provoca la precessione dell'asse di spin, cambiandone l'orientazione. Dopo pochi millisecondi, i nuclei subiscono decadimento beta ed emettono elettroni preferenzialmente lungo l'asse di spin. Dalle direzioni di emissione di questi elettroni di decadimento, gli sperimentatori hanno potuto dedurre le proprietà elettriche e magnetiche del nucleo.

Come scompare un alone

Aaron I. Galonsky e collaboratori, della Michigan State University, hanno studiato due modalità differenti con le quali un nucleo può perdere l'alone. Secondo il primo modello, i neutroni dell'alone sono liberati istantaneamente nell'interazione con il bersaglio (*in alto*). Nel secondo modello, il campo elettrico generato dalle cariche del bersaglio fa vibrare il nucleo, la cui parte centrale carica si muove in una direzione, mentre l'alone si muove in un'altra (*in basso*). Per verificare queste possibilità, il gruppo di Galonsky ha eccitato il nucleo del litio 11 nel modo meno traumatico possibile, facendo passare il fascio attraverso un bersaglio di piombo che produce facilmente un'eccitazione di tipo coulombiano; quindi ha misurato gli angoli di emissione e le energie dei due neutroni e del litio 9 risultanti dalla disintegrazione.

L'energia assorbita era piccola e ben definita. In accordo con il principio di indeterminazione di Heisenberg, allora, la disintegrazione di un sistema in vibrazione dovrebbe richiedere un tempo relativamente lungo, ma al contrario quella del litio 11 è rapida, come se i neutroni fossero liberati istantaneamente dopo la collisione. Questo fatto è stato dedotto da un'osservazione solo apparentemente insignificante: paragonando le velocità del nucleo di litio 9 e dei due neutroni, si è visto che questi si muovevano più lentamente. Lì per lì parve strano che i neutroni dovessero essere più lenti, dato che il processo di eccitazione non era stato brusco.

La spiegazione sta proprio nella durata della disintegrazione. Poiché il litio 11 è elettricamente carico, decelera avvicinandosi al campo elettrico del bersaglio e riaccelera nell'allontanarsi. Nel modello oscillatorio la disintegrazione è così lenta che il nucleo di litio 9 arriverebbe ben oltre il campo elettrico del bersaglio prima che questa potesse aver luogo. In una disintegrazione istantanea, invece, il litio 9 si separa vicino al bersaglio, dove è soggetto alla riaccelerazione coulombiana. Viceversa, i neutroni non sono influenzati dal campo elettrico e procedono lentamente, come osservato. Quindi il gruppo di Galonsky ha concluso che il litio 11 avesse perso l'alone nucleare nell'attraversare il bersaglio.

PRIMA POSSIBILITÀ

BERSAGLIO

L'ALONE SI DISINTEGRA PRIMA CHE IL NUCLEO RIACCELERI

SECONDA POSSIBILITÀ

IL NUCLEO DECELERA AVVICINANDOSI AL BERSAGLIO

IL NUCLEO RALLENTATO INTERAGISCE CON IL BERSAGLIO

IL NUCLEO OSCILLA PRIMA DI DISINTEGRARSI

SAM M. AUSTIN e GEORGE F. BERTSCH sono stati a lungo colleghi alla Michigan State University, dove hanno studiato fisica nucleare rispettivamente come sperimentatore e come teorico. Oggi Austin è professore di fisica alla Michigan State University, mentre Bertsch lavora alla facoltà di fisica dell'Università di Washington.

ROLFS CLAUS E. e RODNEY WILLIAM S., *Cauldrons in the Cosmos: Nuclear Astrophysics*, University of Chicago Press, 1988.

BOYD RICHARD N. e TANIHATA ISAO, *Physics with Radioactive Beams* in «Physics Today», 45, n. 6, 1 giugno 1992.

MUELLER ALEX C. e SHERRILL BRADLEY M., *Nuclei at the Limits of Particle Stability* in «Annual Review of Nuclear and Particle Science», 43, pp. 529-584, 1993.

RIISAGER K., *Nuclear Halo States* in «Review of Modern Physics», 66, n. 3, 1 luglio 1994.

Come le foglie...

Continuiamo a parlare di mimetismo con uno dei più suggestivi esempi offertici dal multiforme mondo degli insetti: il *Phyllium* o insetto foglia che, insieme al collega *Bacillus* o insetto stecco (*qui a fianco, in basso*), fa parte di un ordine, quello dei fasmidi, che riunisce veri e propri campioni di arte mimetica.

Nel genere *Phyllium*, che vive nella regione indo-australiana, sono comprese varie specie tutte aventi la caratteristica di imitare perfettamente, a esclusivo scopo protettivo o criptico come dicono gli zoologi, sia la forma sia il colore delle foglie presenti sulle piante o sul terreno assumendo toni che vanno dal verde brillante - come in questo esempio - al giallo o al ruggine a seconda della stagione e dell'ora del giorno. (Anche un genere di farfalle, *Kallima*, riesce a imitare perfettamente le foglie secche del sottobosco.)

Per passare ancora più inosservati, questi insetti di giorno rimangono quasi sempre immobili muovendosi in cerca di cibo - vegetale - solo di notte. Essi non perdono il loro *aplomb* neppure quando un predatore stacca loro una zampa o un'antenna: queste strutture riescono infatti a rigenerarsi in breve tempo.

Nei fasmidi anche la vita affettiva è scarsa di emozioni: nella maggior parte delle specie la regola è costituita da generazioni di femmine partenogenetiche e i maschi, di solito piccoli e gracili, sono una vera rarità. Dalle uova partenogenetiche, ossia non fecondate, curiosamente simili a semi, nascono bruchetti di un vistoso rosso vivo, destinati quindi a essere falcidiati prima di riuscire a diventare degli insetti perfettamente mimetici.

Non potendo giocare sui colori, l'artista si è sbizzarrita nel sottolineare l'elegante mosaico di foglie che decora l'insetto e che nella sua elaborazione assume la forma di simmetrici fiori costellati da curiosi, minuscoli animaletti. *(ag)*

Tavole a colori
di Eva Hülsmann

Un gruppo di Amish che si dedica alla costruzione di un tetto nella Contea di Lancaster, in Pennsylvania, testimonia la propensione alla cooperazione di questa comunità rurale. Gli Amish traggono vantaggio da una cultura che incoraggia queste forme di aiuto reciproco volontario.

L'economia della solidarietà

Simulazioni al calcolatore dimostrano che nella lotta darwiniana per la sopravvivenza la cooperazione può risultare favorita nei confronti della competizione

di Martin A. Nowak, Robert M. May e Karl Sigmund

La nostra società è dominata dal principio del dare e avere, un principio più antico di qualsiasi tipo di scambio commerciale. Tutti i membri di una famiglia, per esempio, sono impegnati in uno scambio incessante, e per lo più inconscio, di servizi e di beni. Gli economisti sono sempre più affascinati da questo genere di scambi, di cui i biologi hanno trovato esempi anche in gruppi di scimpanzé e di altri primati. Lo stesso Charles Darwin era perfettamente consapevole del ruolo della cooperazione nell'evoluzione umana. Nell'*Origine dell'uomo* scriveva che «l'insufficienza di forza e di velocità dell'uomo, la sua carenza di armi naturali e così via sono più che controbilanciate dalle sue... qualità sociali, che lo portano a dare e ricevere aiuto dai suoi consimili».

Siamo ovviamente ben lontani da quell'esistenza umana selvaggia che il filosofo Thomas Hobbes descriveva come «solitaria, misera, sporca, abbrutente e breve». Eppure, molti tra i primi seguaci di Darwin sottolineavano a tal punto gli aspetti feroci della «lotta per la sopravvivenza» che il russo Pëtr Aleksevic Kropotkin si sentì in dovere di scrivere un libro per contraddirli. In *Mutual Aid,* che il «Times» di Londra recensì come «probabilmente il libro più importante dell'anno» (il 1902), egli tracciò un vasto affresco della cooperazione traendo esempi dalle popolazioni siberiane, dagli abitanti delle isole polinesiane e dalle gilde medievali. Kropotkin fu notoriamente un ideologo dell'anarchia, ma il suo interesse per le scienze naturali non era da semplice dilettante: per una persona che avrebbe visto volentieri la scomparsa dello Stato, era essenziale dimostrare come la cooperazione non fosse imposta da una inflessibile autorità, ma fosse invece ben radicata nella natura umana.

Per un certo verso, le sue argomentazioni hanno avuto un successo ben maggiore di quello che lo stesso Kropotkin potesse prevedere. Un gran numero di studi di antropologia e primatologia mette in luce il ruolo fondamentale della solidarietà nelle antiche società di ominidi. I testi sul comportamento animale sono pieni di esempi di aiuto reciproco: nella pulizia, nell'alimentazione, nell'insegnamento, nei segnali di pericolo, nell'aiuto in caso di scontri e nella caccia in comune. Anche in biologia si trovano esempi di cooperazione a livello di cellule, di organelli e persino di molecole prebiotiche.

Allo stesso tempo, però, la presenza pervasiva della cooperazione sembra essere diventata sempre più paradossale. L'anarchico russo non si era reso conto di quanto la cooperazione possa essere minacciata dallo sfruttamento. Che cosa impedisce ai collaboranti di diventare parassiti? Perché si dovrebbe partecipare a uno sforzo comune invece di sfruttare gli altri? La selezione naturale incoraggia il successo riproduttivo individuale. Come è possibile, allora, che questo meccanismo dia origine a un comportamento altruistico, cioè volto a favorire gli altri a spese della propria stessa progenie?

Ricompense diverse si applicano quando uno, entrambi o nessuno dei due giocatori optano per la cooperazione. La distribuzione del punteggio genera il classico paradosso della teoria dei giochi noto come Dilemma del prigioniero.

Per rispondere a questa domanda, ci sono due vie principali che vanno sotto il nome di selezione familiare e di aiuto reciproco. I due concetti non sono mutuamente esclusivi, ma sono chiaramente distinti. La selezione familiare ha radici genetiche (si veda l'articolo *Il riconoscimento della parentela* di David W. Pfennig e Paul W. Sherman, a pagina 72). Se un gene contribuisce al successo riproduttivo di parenti stretti del suo portatore, favorisce la riproduzione di copie di se stesso. All'interno di una famiglia, una buona azione è già la propria ricompensa. Ma una buona azione nei confronti di un estraneo deve essere ricambiata perché i conti tornino. L'aiuto reciproco - lo scambio di azioni altruistiche in cui i benefici superano i costi - è sostanzialmente uno scambio economico. Funziona in modo meno diretto della selezione familiare ed è quindi più soggetto all'abuso.

Due partiti possono concludere un accordo mutuamente proficuo, ma ciascuno potrebbe trarre vantaggi ancora maggiori negando il proprio contributo. Nella società moderna, la tentazione di imbrogliare è tenuta a freno da un enorme apparato di leggi e di imposizioni.

Ma come può funzionare l'altruismo reciproco in assenza di queste istituzioni autoritarie tanto detestate dagli anarchici come Kropotkin? Per rispondere a questa difficile domanda, è meglio partire da semplici sistemi ideali.

Il Dilemma del prigioniero

Robert L. Trivers, un sociobiologo (già avvocato) che lavora attualmente all'Università della California a Santa Cruz, ha preso in prestito dalla teoria dei giochi una metafora nota come Dilemma del prigioniero. Nella sua formulazione originaria, risalente ai primi anni cinquanta, a ciascuno dei due prigionieri viene chiesto se l'altro abbia commesso un crimine; la gravità della loro pena dipende dal fatto che uno, entrambi o nessuno dei due dichiari la colpevolezza dell'altro. La situazione può essere vista come un semplice gioco. I due giocatori devono solo scegliere se vogliono o non vogliono cooperare l'uno con l'altro. In una versione del Dilemma del prigioniero, se entrambi decidono di cooperare ottengono un compenso di tre punti ciascuno. Se entrambi «defezionano» (cioè non cooperano) ottengono solo un punto ciascuno. Ma se un giocatore defeziona e l'altro coopera, chi defeziona riceve cinque punti, mentre il giocatore che ha scelto di cooperare non riceve nulla.

Coopereranno? Se il primo giocatore defeziona, il secondo non otterrebbe nulla cooperando, e quindi è chiaro che dovrebbe defezionare. Ma anche se il primo giocatore coopera, il secondo dovrebbe defezionare, in quanto questa combinazione gli dà cinque punti invece di tre. Indipendentemente dal comportamento del primo giocatore, l'opzione migliore per il secondo è defezionare. Ma il primo giocatore è esattamente nella stessa posizione. Entrambi i giocatori, quindi, sceglieranno di defezionare e riceveranno solo un punto ciascuno. Perché non hanno cooperato?

La decisione dei prigionieri chiarisce la differenza tra ciò che è bene dal punto di vista individuale e ciò che è bene dal punto di vista della collettività. Questo conflitto mette in pericolo quasi tutte le forme di cooperazione, inclusi il commercio e l'aiuto reciproco. La ricompensa per la reciproca cooperazione è maggiore della punizione per la reciproca defezione, ma una defezione unilaterale è più remunerativa della ricompensa e fa fare al cooperante sfruttato la figura dello stupido, il che è ancora peggio di una punizione. Questa sequenza - tentazione, ricompensa, punizione, figura dello stupido - implica che la mossa migliore sia defezionare sempre, indipendentemente dalla mossa dell'avversario. La logica porta inevitabilmente alla defezione reciproca.

Molti non si sentono soddisfatti da questa conclusione. Nella realtà dei fatti, spesso cooperano, sulla base di sentimenti di solidarietà o di altruismo. Anche nel mondo degli affari la defezione è relativamente rara, forse per la pressione proveniente dalla società. Queste preoccupazioni, però, non dovrebbero incidere in un gioco che contempli la vita in senso strettamente darwiniano, dove ogni forma di premio (che si tratti di cibo, della conquista del partner o dello sfuggire ai predatori) si converte in definitiva in un'unica remunerazione: la prole.

Tornei virtuali

È possibile immaginare un esperimento mentale in cui un'intera popolazione sia formata da giocatori programmati. Ciascuno di questi automi è incrollabilmente affezionato a una strategia prefissata e coopera sempre o defeziona sempre. La popolazione è impegnata in un torneo all'italiana del Dilemma del prigioniero. La vincita di ogni partecipante dipende dagli altri giocatori incontrati e quindi dalla composizione della popolazione. Chi defeziona, però, riceve sempre più di quanto guadagni chi coopera. Al termine del torneo immaginario, i giocatori si riproducono, creando una progenie del proprio stesso tipo (defezionanti o cooperanti). La generazione successiva intraprende a sua volta un torneo all'italiana e viene ripagata in termini di prole; e così via. In questa caricatura dell'evoluzione biologica, in cui il premio è dato dal numero di figli e le strategie sono ereditate, il risultato è ovvio: i defezionanti cresceranno costantemente di una generazione all'altra e finiranno con il sommergere l'intera popolazione.

Ci sono diversi modi per sfuggire a questo destino. In molte società, gli stessi due individui non interagiscono una volta sola ma di frequente, e ciascuno ci penserà due volte a defezionare qualora ciò possa provocare la successiva defezione dell'altro. Quindi, in caso di partite ripetute, la strategia può cambiare in funzione di quanto è avvenuto nelle giocate precedenti.

Al contrario di un singolo Dilemma del prigioniero, dove è sempre meglio defezionare, esistono innumerevoli strategie per la versione iterata e nessuna è in assoluto la migliore. Se il giocatore avversario, per esempio, decide di cooperare sempre, la cosa migliore sarà defezionare sempre. Ma se decide di cooperare finché voi non defezionate e poi non cooperare mai più, bisognerà stare attenti a non indisporlo: la tentazione di tradire e prendersi cinque punti invece di tre sarà più che controbilanciata dalla perdita che ci si può attendere nelle giocate successive, in cui non si può sperare di prendere più di un punto.

GIOCO PRECEDENTE			STRATEGIE			
Ultima mossa	Mossa dell'avversario	Esito	Coopera sempre	Defeziona sempre	Pan per focaccia	Pavlov
C	C	RICOMPENSA	C	D	C	C
C	D	FIGURA DELLO STUPIDO	C	D	D	D
D	C	TENTAZIONE	C	D	C	D
D	D	PUNIZIONE	C	D	D	C

COOPERAZIONE / DEFEZIONE

	TEMPO →						
COOPERA SEMPRE	C	C	C	C	C	C	C
PAN PER FOCACCIA	C	C	C	D	C	C	C
DEFEZIONA SEMPRE	D	D	D	D	D	D	D
PAN PER FOCACCIA	D	D	D	C	D	D	D
COOPERA SEMPRE	C	C	C	C	C	C	C
PAVLOV	C	C	C	D	D	D	D
DEFEZIONA SEMPRE	D	D	D	D	D	D	D
PAVLOV	C	D	C	C	D	C	D
PAN PER FOCACCIA	C	C	C	C	D	C	D
PAN PER FOCACCIA	C	C	C	D	C	D	C
PAVLOV	C	C	C	C	D	C	C
PAVLOV	C	C	C	D	D	C	C

Le strategie di risposta per la versione iterata del Dilemma del prigioniero possono dipendere dall'esito delle giocate precedenti. Nella figura sono illustrate quattro strategie delle 16 possibili (*in alto*). Ripetendo le partite si osservano schemi persistenti di cooperazione (*in blu*) e defezione (*in rosso*) quando le strategie selezionate sono messe a confronto (*in basso*). Una successione stabilizzata può ricostituirsi o alterarsi in seguito a una singola mossa errata (*in arancione*).

Nelle colonie del vampiro *Desmodus rotundus* si osservano spesso esempi di cooperazione reciproca. Un pipistrello che si sia abbondantemente nutrito del sangue di un cavallo o di un bovino dimostra il suo altruismo aiutando un compagno che non è riuscito a trovare una preda. Per nutrirlo, rigurgita una parte del sangue contenuto nel suo stomaco.

La mancanza di un'opzione che sia sicuramente migliore di tutte le altre costituisce un punto cruciale. Non esiste una ricetta categorica per giocare alla versione iterata del Dilemma del prigioniero: il successo dipende dalla strategia dell'altro giocatore, che non si può conoscere in anticipo. Una strategia che funziona in certi ambienti può fallire miseramente in altri.

Alla fine degli anni settanta, il politologo Robert Axelrod dell'Università del Michigan organizzò sul suo calcolatore tornei della versione iterata del Dilemma del prigioniero. I contendenti - programmi forniti dai suoi colleghi - erano piuttosto raffinati, ma alla fine la vittoria andò a quello più semplice, dal nome appropriato di «pan per focaccia» («Tit-for-Tat», in inglese). Questa strategia inizia cooperando e quindi ripete sempre la mossa precedente dell'avversario.

È da notare che il giocatore che adotta pan per focaccia non è mai in testa in nessuna fase del gioco iterato, dato che è l'ultimo a defezionare. Eppure, il giocatore che usa questa strategia può vincere il torneo, in quanto il Dilemma del prigioniero non è un gioco a somma zero: è possibile far punti senza toglierli ad altri. Con la sua trasparenza, pan per focaccia convince spesso gli avversari della convenienza di cooperare. Nei tornei di Axelrod, la strategia pan per focaccia (messa in campo dal teorico dei giochi Anatol Rapoport) si aggiudicava molte remunerative giocate di cooperazione, mentre altri partecipanti al torneo si impantanavano in continue defezioni.

Vincendo il torneo all'italiana, pan per focaccia risultò più rappresentato nella generazione successiva di ogni altra strategia. Tendenzialmente, inoltre, generavano più figli i giocatori che avevano cooperato di quelli che non lo avevano fatto. A ogni generazione, questa strategia trovava un ambiente sempre più congeniale, mentre quelle che approfittavano implacabilmente dei cooperanti riuscivano solo a esaurire le proprie risorse.

Avversari imprevedibili

Abbiamo di recente compiuto simulazioni al calcolatore con una vasta gamma di strategie che basavano la propria mossa successiva sul risultato del giro precedente invece che solo sulla mossa precedente dell'avversario (come fa pan per focaccia). Una strategia fondata sul risultato precedente deve determinare la risposta per ciascuna di quattro eventualità: tentazione, ricompensa, punizione o perdita. Due risposte possibili per ciascuno dei quattro esiti precedenti danno 16 possibili tipi di giocatore.

Erano ammesse anche strategie «stocastiche» che rispondono ai quattro possibili esiti cambiando solo la loro propensione statistica a cooperare. Queste strategie non sono obbligate a rispondere sempre allo stesso modo a un dato esito. Una forma di giocatore stocastico, per esempio, potrebbe cooperare per il 90 per cento delle volte dopo la prima ricompensa. Questa incertezza simula gli inevitabili errori che si verificano durante le interazioni reali.

La somma delle risposte stocastiche dava luogo a un'enorme matrice di possibilità. Un calcolatore cercava tra questi giocatori quelli di maggior successo simulando le forze della selezione naturale, aggiungendo a ogni centesima generazione una piccola porzione di una nuova strategia stocastica. Abbiamo seguito numerose di queste mutazioni-selezioni per milioni di generazioni, non perché fossero necessarie tante iterazioni per far emergere la cooperazione, ma perché questa ampiezza ci consentiva di mettere alla prova un grandissimo numero di strategie possibili.

Le popolazioni cooperanti sono dominate a volte da una variante generosa della strategia pan per focaccia, che casualmente offre cooperazione in risposta alla defezione. Ma molto più frequentemente regna sovrana una strategia del tutto differente, chiamata «Pavlov» dai matematici David P. Kraines della Duke University e Vivian Kraines del Meredith College di Raleigh, nel North Carolina. Dopo la prima ricompensa per una cooperazione reciproca, il giocatore Pavlov ripete la precedente mossa cooperativa. Analogamente, dopo averla fatta franca con una defezione unilaterale ripete l'ultima mossa. Ma dopo essere stato punito per una defezione reciproca, Pavlov passa alla cooperazione. E dopo aver fatto la figura dello stupido per una cooperazione unilaterale, reagisce defezionando. In breve, la regola di Pavlov dice di attenersi alla mossa precedente se ha pagato bene (ricompensa o tentazione) ma di cambiare se l'ultima mossa ha pagato poco (punizione o figura dello stupido).

Questo principio del «se vinci stai,

se perdi cambia» sembra funzionare in molte altre situazioni. In psicologia animale è considerato fondamentale: un ratto è subito pronto a ripetere un'azione che comporti una ricompensa, mentre tende ad abbandonare un comportamento che abbia conseguenze spiacevoli. Anche nell'allevamento dei bambini trova ampia applicazione il rude metodo del bastone e della carota.

Nelle partite iterate di Dilemma del prigioniero, la ritorsione dopo essere stati sfruttati è vista di solito come testimonianza di un comportamento simile al pan per focaccia, ma vale anche per i giocatori di tipo Pavlov. Una società di strateghi Pavlov è molto stabile contro gli errori. Una erronea defezione tra due suoi membri porta a un giro di defezione reciproca e poi di nuovo alla cooperazione. Ma di fronte a un giocatore che non si vendica, un giocatore Pavlov continua a defezionare. Questo comportamento ostacola l'affermarsi all'interno della comunità di giocatori che cooperino sempre. Al contrario, una società di giocatori pan per focaccia generosi non discrimina nei confronti di chi coopera senza riserve, una generosità costosa sul lungo periodo, perché i giocatori che non compiono ritorsioni possono aumentare all'interno della popolazione e in definitiva minare la cooperazione consentendo agli sfruttatori di prosperare.

Pur essendo una strategia efficace per impedire agli sfruttatori di invadere una società cooperativa, Pavlov se la cava piuttosto male con chi non coopera. Contro i defezionanti ostinati, per esempio, a ogni secondo giro cerca di riprendere la cooperazione. Nei tornei di Axelrod, Pavlov si sarebbe classificato nelle ultime posizioni. I suoi vantaggi si evidenziano solo dopo che strategie più dure e inflessibili come pan per focaccia hanno aperto la strada allontanando l'evoluzione dai sentieri della defezione.

Cooperazione innata

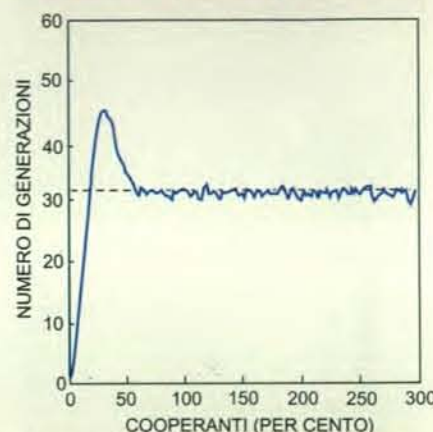
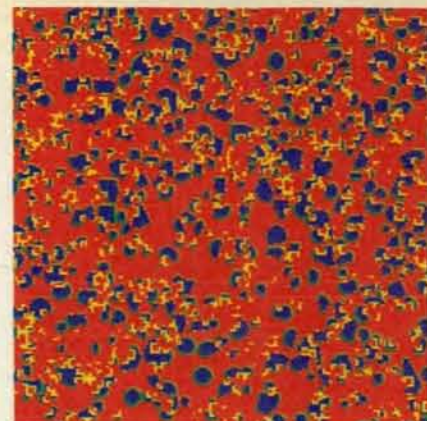
Si può sicuramente concludere che non è affatto improbabile l'emergere e il perdurare di un comportamento cooperativo, sempre che i partecipanti si incontrino ripetutamente, si riconoscano l'un l'altro e ricordino il risultato degli incontri precedenti. Queste circostanze sono forse comuni nella vita quotidiana, a casa o in ufficio ma, nel più vasto mondo degli esseri viventi, richiedono un alto grado di raffinatezza. Eppure, osserviamo la cooperazione anche tra organismi semplici che non possiedono queste abilità. Inoltre, le strategie di cui si è parlato funzionano solo se i benefici provenienti da incontri futuri non sono troppo esigui rispetto ai guadagni attuali. Ancora una volta, questa aspettativa può essere ragionevole per molte delle attività umane, ma per numerosi organismi più semplici il compenso differito sotto forma di successo riproduttivo può avere scarso peso: se la vita è breve e imprevedibile, è molto modesta la spinta evolutiva a compiere investimenti a lungo termine.

Ma che dire delle creature, come molti invertebrati, che sembrano mostrare forme di cooperazione reciproca anche se spesso non sanno riconoscere i singoli giocatori o ricordare le loro azioni? E se il compenso futuro è fortemente ridotto? Come si possono stabilire e mantenere relazioni altruistiche in queste situazioni? Una soluzione possibile è che questi giocatori abbiano un insieme fisso di compagni di gioco e siano certi di trovare quasi sempre costoro come avversari. In generale, è difficile che si possa essere così selettivi. Ma esiste una circostanza in cui non solo è facile, ma addirittura automatico. Se i giocatori occupano posizioni fisse, e se interagiscono solo con gli immediati vicini, non ci sarà bisogno di riconoscere e ricordare, perché gli altri giocatori sono prefissati dalla geometria. In molte delle nostre simulazioni i giocatori incontrano sempre un campione rappresentativo della popolazione, ma abbiamo anche osservato in dettaglio scenari in cui ogni giocatore interagisce solo con pochi vicini su una griglia bidimensionale. Questi «giochi spaziali» sono stati messi a punto molto recentemente e danno una piega del tutto nuova al Dilemma del prigioniero.

I nuovi giochi spaziali

Non dovrebbe sorprendere il fatto che la cooperazione sia più facile da mantenere in una popolazione sedentaria: i defezionanti possono prosperare in una folla anonima, ma tra vicini l'aiuto reciproco è frequente. Si tratta di un concetto abbastanza chiaro. In molti casi, però, interazioni strutturate territorialmente danno luogo a cooperazione anche se non si prevede che la relazione abbia alcun seguito. Questo avviene anche nel caso, apparentemente senza speranza, di un singolo incontro di Dilemma del prigioniero.

Consideriamo una versione del torneo all'interno di uno spazio limitato, con ciascun membro della popolazione inserito in una casella di una scacchiera estesa. Ciascun giocatore è un cooperante puro o un defezionante puro e interagisce solo con gli otto immediati vicini giocando con ciascuno di essi una mano di Dilemma del prigioniero. Alla generazione successiva, la casella è ereditata da chi abbia totalizzato il punteggio maggiore.

Un cooperante isolato sarà sfruttato dai defezionanti che lo circondano e soccomberà. Ma quattro cooperanti raggruppati possono anche farsi valere, dato che ciascuno interagisce con tre cooperanti; un defezionante, in quanto esterno al gruppo, può raggiungerne e sfruttarne al massimo due. Se il compenso per il tradimento non è troppo grande, i gruppi di cooperanti prospereranno. Al contrario, i defezionanti isolati andranno sempre bene perché saranno circondati da cooperanti di cui approfittare. Ma diffondendosi, i defezionanti si circondano di consimili e quindi riducono le proprie possibilità di guadagno.

L'evoluzione di questi sistemi spaziali dipende in realtà dal valore delle ricompense. È certamente possibile che i cooperanti siano spazzati via dalla scacchiera. Ma spesso troviamo mosaici molto variabili in cui entrambe le strategie sopravvivono. Cooperanti puri e defezionanti puri possono coesistere per un tempo indefinito, in proporzioni fluttuanti, ma sul lungo periodo la composizione media della popolazione è prevedibile. Si tratta di una conclusione molto forte che, in linea di massima, vale anche per altri tipi di griglie e perfino per matrici irregolari o casuali. Il requisito di fondo è che ciascun giocatore non interagisca con troppi vicini.

Le regole semplici e lineari di questi giochi spaziali danno origine a dinamiche di straordinaria complessità. Possono nascerne figure che vagano per la scacchiera riassumendo periodicamente la forma iniziale, oppure motivi che crescono senza limite. In alcuni casi, sembra di essere di fronte ai prodotti del gioco «Vita» di John Horton Conway, uno schema per costruire configurazioni spaziali in evoluzione usando semplici regole imitative di organismi che si riproducono. Potrebbe anche essere che i risultati generati da una qualsiasi delle nostre versioni spaziali del Dilemma del prigioniero - configurazioni irregolari o tappeti persiani simmetrici - siano intrinsecamente imprevedibili e caotici, nel senso che nessun algoritmo potrebbe prevederne il comportamento. Forse matematici più acuti potrebbero individuare un metodo per determinare le configurazioni future. Noi ci accontentiamo di osservare gli arabeschi che si dispiegano.

Partite spaziali di Dilemma del prigioniero mostrano l'evoluzione di una griglia di giocatori, ciascuno dei quali interagisce solo con gli avversari che si trovano nelle otto caselle adiacenti. La porzione di popolazione composta da cooperanti raggiunge gradualmente un valore stabile dopo molte generazioni di gioco (*in basso a sinistra*). In una istantanea presa dopo 50 generazioni (*in alto a sinistra*), ciascun elemento blu della griglia contiene un cooperante che era cooperante nel turno precedente; il verde mostra un cooperante che prima era un defezionante; il rosso rappresenta un defezionante che era già un defezionante; il giallo indica un defezionante che prima era un cooperante. Se le condizioni iniziali sono simmetriche, il gioco spaziale può finire con il generare un motivo molto simile a quello di un tappeto persiano (*qui sopra*).

Così è la vita

Lungo tutta la storia evolutiva della vita, la cooperazione tra piccole unità ha portato alla comparsa di strutture più complesse, come nel caso dell'emergere di organismi multicellulari da organismi unicellulari. In questo senso, la cooperazione risulta fondamentale per l'evoluzione quanto lo è la competizione.

Le strutture spaziali, in particolare, hanno un'azione protettiva nei confronti della diversità. Esse consentono che cooperanti e defezionanti coesistano a fianco a fianco. In un contesto diverso ma correlato, configurazioni spaziali analoghe consentono che sopravvivano insieme popolazioni di ospiti e di parassiti, o di prede e di predatori, nonostante l'intrinseca instabilità delle loro interazioni.

Questo tipo di strategie cooperative è forse stato fondamentale per l'evoluzione prebiotica, che molti ricercatori ritengono si sia verificata su superfici piuttosto che entro il famoso brodo primordiale. Catalizzare la replica di una molecola costituisce una forma di aiuto reciproco; quindi, una catena di catalizzatori, con ciascun anello che alimenta se stesso, sarebbe il primo esempio di aiuto reciproco (si veda l'articolo *L'origine dell'informazione genetica* di Manfred Eigen, William Gardiner, Peter Schuster e Ruthild Winkler-Oswatitsch in «Le Scienze» n. 154, giugno 1981).

Le reazioni chimiche cooperative sarebbero risultate vulnerabili a mutanti genetici «fraudolenti» portati a prendere più che a dare aiuto catalitico, e si riteneva che queste difficoltà minassero alla base molte teorie sull'evoluzione prebiotica fondate sulle catene cooperative. Ma Maarten C. Boerlijst e Pauline Hogeweg dell'Università di Utrecht hanno recentemente dimostrato con simulazioni al calcolatore che strutture spaziali autogeneratisi simili a quelle immaginate da noi possono intralciare la diffusione di molecole parassite distruttive.

I nostri modelli, per rozzi che siano, illustrano il modo in cui potrebbe nascere e conservarsi la cooperazione in sistemi biologici reali. Creature sofisticate possono essere indotte a seguire strategie che favoriscano la cooperazione a causa di interazioni ripetute tra individui in grado di riconoscersi e ricordarsi l'un l'altro. Ma anche in organismi più semplici può esistere la cooperazione, forse in virtù di strutture spaziali a organizzazione autonoma generate da interazioni con immediati vicini in qualche data matrice spaziale. Nel corso dell'evoluzione, appare evidente che la cooperazione abbia avuto l'opportunità di operare positivamente in ogni ambito, dagli esseri umani alle molecole. In un certo senso, la cooperazione potrebbe essere più antica della vita stessa.

MARTIN A. NOWAK, ROBERT M. MAY e KARL SIGMUND hanno sperimentato svariati esempi di cooperazione e competizione nelle rispettive carriere. Nowak lavora presso il Dipartimento di zoologia dell'Università di Oxford. May è Royal Society Research Professor all'Università di Oxford e all'Imperial College di Londra. Sigmund è professore all'Istituto di matematica dell'Università di Vienna. Tutti e tre lavorano su modelli matematici applicabili a un'ampia gamma di problemi relativi alla biologia evolutiva.

NOWAK MARTIN A. e SIGMUND KARL, *Tit-for-Tat in Heterogeneous Populations* in «Nature», 355, n. 6357, 1992.

NOWAK MARTIN A. e MAY ROBERT M., *Evolutionary Games and Spatial Chaos* in «Nature», 359, n. 6398, 1992.

NOWAK MARTIN A. e SIGMUND KARL, *A Strategy of Win-Stay, Lose-Shift That Outperforms Tit-for-Tat in the Prisoner's Dilemma Game* in «Nature», 364, n. 6432, 1993.

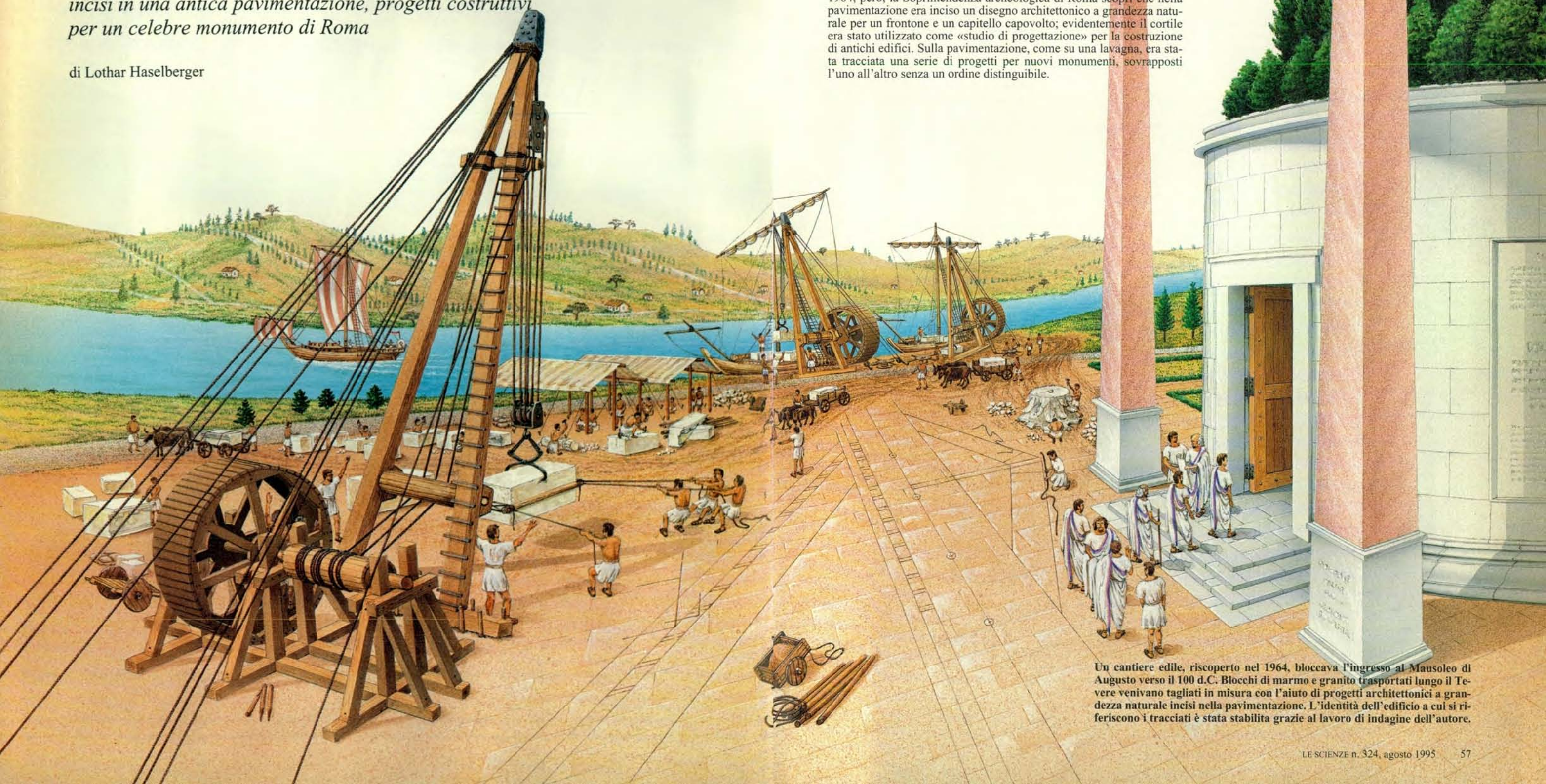
SIGMUND KARL, *Games of Life: Explorations in Ecology, Evolution, and Behaviour*, Penguin, 1995.

Un progetto architettonico di 2000 anni fa

Con paziente lavoro di indagine si sono scoperti, incisi in una antica pavimentazione, progetti costruttivi per un celebre monumento di Roma

di Lothar Haselberger

Negli anni trenta, sperando di esaltare gli italiani con i gloriosi ricordi dell'Impero romano, Benito Mussolini ordinò che venissero eseguiti ampi, anche se frettolosi, scavi archeologici nella capitale. Nei secoli, le piene annuali del Tevere avevano lasciato uno spesso strato di depositi alluvionali in tutta la città. In particolare, intorno al mausoleo celebrativo eretto verso il 30 a.C. da Augusto si erano accumulati parecchi metri di terriccio; dopo averne asportato uno spessore di sei o sette metri, gli scavatori si imbatterono in una pavimentazione fatta di massicci blocchi di pietra.

Con la seconda guerra mondiale, la scoperta venne dimenticata. Nel 1964, però, la Soprintendenza archeologica di Roma scoprì che nella pavimentazione era inciso un disegno architettonico a grandezza naturale per un frontone e un capitello capovolto; evidentemente il cortile era stato utilizzato come «studio di progettazione» per la costruzione di antichi edifici. Sulla pavimentazione, come su una lavagna, era stata tracciata una serie di progetti per nuovi monumenti, sovrapposti l'uno all'altro senza un ordine distinguibile.

Un cantiere edile, riscoperto nel 1964, bloccava l'ingresso al Mausoleo di Augusto verso il 100 d.C. Blocchi di marmo e granito trasportati lungo il Tevere venivano tagliati in misura con l'aiuto di progetti architettonici a grandezza naturale incisi nella pavimentazione. L'identità dell'edificio a cui si riferiscono i tracciati è stata stabilita grazie al lavoro di indagine dell'autore.

La cartina mostra come il Tevere passi vicino al Mausoleo di Augusto e ad antiche botteghe per la lavorazione del marmo (*aree tratteggiate*). Il Pantheon si trova 800 metri a sud del mausoleo. In epoca imperiale questa zona, il Campo Marzio, costituiva la periferia settentrionale della città.

Negli anni ottanta il mio collega Henner von Hesberg dell'Università di Colonia richiamò la mia attenzione su questa scoperta. Non uno solo, ma due dei disegni incisi rappresentavano un frontone (il classico coronamento architettonico a forma triangolare), e von Hesberg sperava che da essi io potessi ricostruire un ipotetico porticato eretto di fronte al Mausoleo di Augusto. Quando riprodussi a mia volta i disegni, però, scoprii un fatto scoraggiante: i due frontoni erano di gran lunga troppo grandi per poter essere correlati a questo edificio.

Il gradino superiore della scalinata che precede il mausoleo è largo circa sei metri, ma il frontone più piccolo, nella vista in alzato, ha una larghezza di ben 17 metri. A questo disegno si sovrappongono le linee curve di un capitello corinzio, il cui abaco (la membratura superiore del capitello, sulla quale poggia l'architrave) ha un diametro di 2,8 metri, ossia di gran lunga superiore a quelli visibili nella maggior parte degli edifici conservatisi fino a oggi. La seconda vista in alzato è tracciata utilizzando la stessa linea di base della prima, ma capovolta. L'angolo alla base del triangolo, di 24 gradi, è piuttosto grande: di solito i romani si attenevano più strettamente ai 14 gradi codificati dagli architetti greci. Dal frammento oggi visibile del disegno si deduce che il frontone dovesse avere una larghezza di almeno 18 metri, e probabilmente molto superiore.

La dimensione stessa dei tracciati indica chiaramente che dovevano essere a grandezza naturale. Con tutta probabilità venivano utilizzati per misurare direttamente i blocchi di marmo che servivano alla costruzione delle strutture rappresentate; progetti architettonici di tipo analogo sono incisi anche sulle pareti interne incompiute del tempio di Apollo a Didime, nell'attuale Turchia (si veda l'articolo *I progetti di costruzione per il tempio di Apollo a Didime* di Lothar Haselberger in «Le Scienze» n. 210, febbraio 1986). Un ottimo esempio della stessa tecnica, risalente al Seicento, si trova proprio a Roma. I progetti per i campaniletti aggiunti al Pantheon da Gian Lorenzo Bernini - gratificati del poco lusinghiero appellativo di «orecchie d'asino» e demoliti alla fine del secolo scorso - sono tracciati sulla faccia superiore delle lastre del cornicione che circonda la cupola.

Ma a quali edifici monumentali si riferiscono i progetti architettonici trovati presso il Mausoleo di Augusto? Tentare di trovare una corrispondenza sembrava un'impresa disperata quanto cercare il proverbiale ago nel pagliaio. Nessun edificio esistente nelle vicinanze era abbastanza grande; se però si passava a considerare l'intera città, ci si trovava di fronte a un numero scoraggiante di possibilità. Non sono un sostenitore del metodo spesso abusato di correlare ogni nuova scoperta a una delle relativamente poche strutture conosciute di epoca classica; queste associazioni danno l'impressione di essere ben fondate, ma in realtà sono spesso speculative.

a

b

Le incisioni nella pavimentazione davanti al Mausoleo di Augusto costituiscono i progetti per due frontoni (*in rosso e in verde*). Questi elementi architettonici, tracciati con la linea di base in comune, sono stati ottenuti per estrapolazione (*parti in colore chiaro*) laddove risultano ancora sepolti. Nel progetto più grande (*in rosso*) si distinguono diverse parti del frontone (*linee parallele in a*), la posizione delle mensole (*tratti verticali*) e il centro delle sottostanti colonne (*cerchio in b*). Il frontone più piccolo, il capitello (*a destra*) e il trapezoide (*al centro*) non sono ricollegabili ad alcun edificio noto.

Tuttavia il mio pessimismo era ingiustificato. Un punto era già ben chiaro: benché antichi - come dimostrano i sei metri di sedimenti che li ricoprivano - i tracciati erano di epoca posteriore a quella di Augusto. La pavimentazione su cui sono incisi circonda la scalinata che sale al mausoleo e si trova allo stesso livello del più basso gradino visibile. Dato che di solito non si costruisce una scala con il primo gradino a livello del terreno, supposi che la pavimentazione incisa non fosse quella originaria; in effetti, i resoconti di scavo del 1938 rivelano che la base delle pareti del mausoleo si trova 1,7 metri più in basso di questo livello.

Via via che si accumulavano i depositi alluvionali del Tevere, intorno al mausoleo vennero a sovrapporsi tre pavimentazioni: quella originaria, ancora sepolta; la nostra «lavagna», 1,7 metri più in alto; e una recente, di acciottolato, che fu asportata negli anni trenta. Il cortile con i disegni architettonici si trova allo stesso livello di altre pavimentazioni costruite in quest'area, nota come Campo Marzio, verso il 100 d.C.

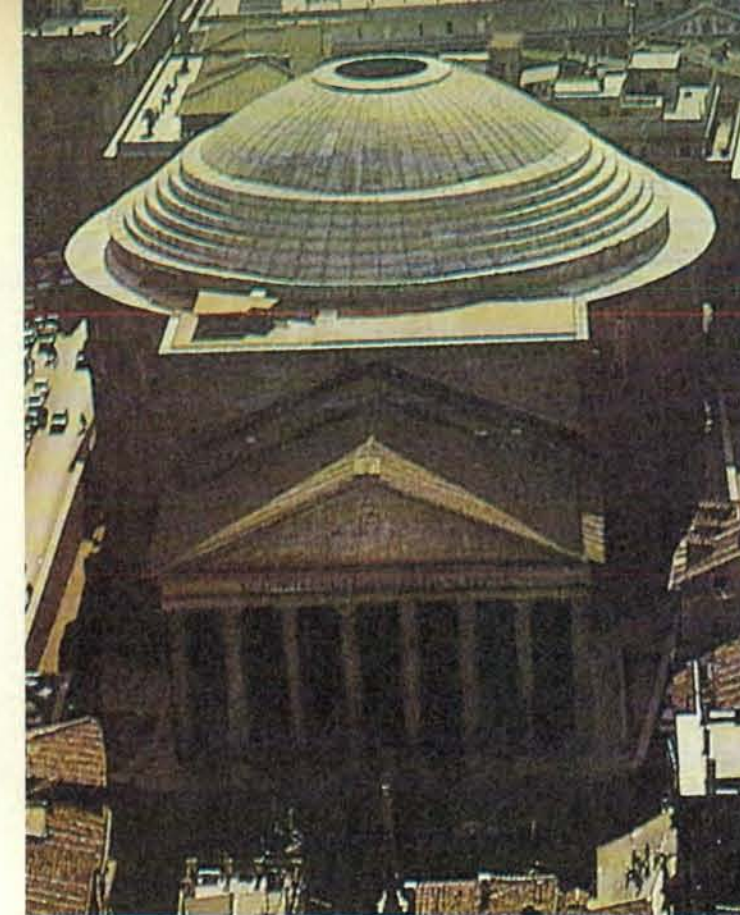
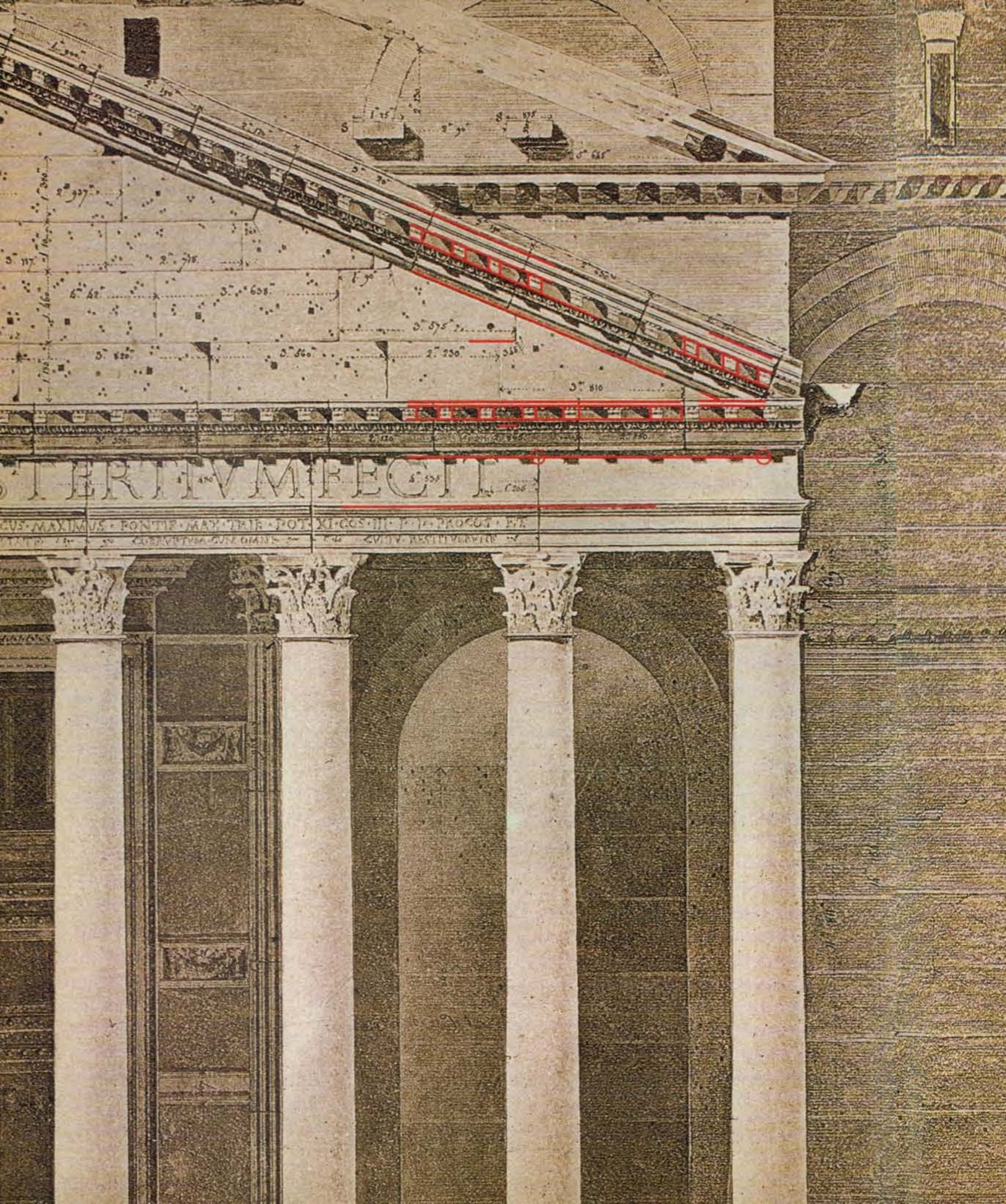
Questa datazione chiaramente postaugustea sollevava un altro problema. Il mausoleo, circondato da splendidi giardini e ornato da obelischi che celebravano il divo Augusto, era un grandioso monumento imperiale. Chi altri, oltre ad Augusto stesso, avrebbe potuto prendersi la libertà di usare la zona di fronte all'edificio come cantiere di costruzione? Non c'è dubbio che l'area fosse di proprietà imperiale; deve essere stato quindi uno degli imperatori successivi, o qualcuno che agiva in suo nome, ad autorizzare un simile impiego.

Fu a questo punto che abbandonai il problema, nel 1985. Nella primavera del 1992 tenni un seminario sull'edificio che è considerato il vertice dell'architettura romana, ossia il Pantheon. L'estate successiva, mentre tornavo a casa una sera dopo una passeggiata in campagna, i miei pensieri tornarono ai disegni che avevano ormai accumulato polvere nel mio studio: sembrava assurdo, ma certamente assomigliavano alla facciata del Pantheon. Mi proposi quindi di fare un confronto dettagliato, se non altro per soddisfare la mia curiosità.

Per quanto strano possa sembrare, però, non riuscivo a trovare un rilievo preciso del frontone del Pantheon. Dopo molti sforzi rintracciai un disegno quotato realizzato nel 1813 dall'architetto francese Achille Leclère; tuttavia le misurazioni non erano fornite con precisione sufficiente, e quindi continuai le mie ricerche. A poco a poco, da un libro inglese del 1821, da uno studio americano del 1924 e da uno danese del 1968, raccolsi dati su vari elementi della facciata. Quando finalmente misi insieme i frutti delle mie ricerche, fui sopraffatto dall'entusiasmo: la corrispondenza con il più grande dei due tracciati incisi era straordinaria.

Lo studio danese precisa che l'angolo, insolitamente grande, alla base del frontone è «circa 23 gradi»; come ho già detto, nel progetto architettonico esso è pari a 24 gradi. Le mensole sporgenti al di sotto delle cornici superiore e inferiore e l'altezza del fregio orizzontale corrispondono al tracciato con uno scarto di un centimetro. (La distanza media fra le mensole è di circa 82 centimetri, mentre nel progetto è di 81 centimetri.) La distanza fra le grandi colonne è pari, da centro a centro, a 4,52 metri; nel disegno è di 4,51 metri. La posizione delle due colonne più vicine all'angolo coincide con due incisioni circolari che appaiono nel tracciato; in quest'ultimo è indicata persino una linea orizzontale dove si incontrano due file di conci.

Non ho quindi dubbi sul fatto che il progetto architettonico scoperto presso il Mausoleo di Augusto sia stato usato per costruire l'imponente facciata del Pantheon. Quest'ultimo fu commissionato da Traiano o dal suo successore, Adriano, e terminato verso il 120 d.C. (Del precedente Pantheon fatto costruire nello stesso sito da Marco Vipsanio Agrippa, genero di Augusto, sono stati finora ritrovati solo alcuni blocchi delle fondamenta.) Consacrato come chiesa nel 609, rimane a tutt'oggi un sacrario che ospita le tombe di italiani illustri, fra i quali Raffaello.

L'ingresso del mausoleo dove venivano preparati i blocchi per la costruzione del Pantheon si trova a 800 metri dal sito dell'edificio; lo svantaggio di questa distanza abbastanza rilevante doveva essere compensato dalla presenza del Tevere, lungo il quale il marmo poteva essere trasportato per mezzo di chiatte. Evidentemente i blocchi venivano scaricati, tagliati in misura e quindi avviati al cantiere su carri. Il trasporto di blocchi di pietra che pesavano parecchie tonnellate non era certo un problema per la tecnologia romana: basti pensare ai molti obelischi di origine egizia - monoliti di granito alti anche 33 metri - che tuttora ornano la città di Roma. Il Pantheon è impreziosito da pietre policrome pregiate importate dagli angoli più remoti dell'Impero, che ci danno un'idea

Il rilievo della facciata del Pantheon eseguito nel 1813 dall'architetto Achille Leclère (*nella pagina a fronte*) fornisce le dimensioni più precise finora misurate. Il più grande fra i due progetti di frontone incisi presso il Mausoleo di Augusto è qui sovrapposto (*in rosso*) al rilievo di Leclère. L'ampio angolo alla base del «triangolo» corrisponde con uno scarto di un grado a quello del progetto; i bordi delle cornici, le posizioni delle colonne e delle mensole e persino il margine di una fila di conci nel frontone si scostano di non più di un centimetro. Nuove misurazioni della facciata del Pantheon permetteranno di verificare queste corrispondenze con una precisione ancora maggiore.

della vastità del traffico di materiali ornamentali in epoca imperiale.

Oltre a consentirci di gettare uno sguardo sui metodi costruttivi degli architetti romani, il progetto inciso presso il Mausoleo di Augusto è un ottimo esempio delle loro concezioni estetiche. Le tre dimensioni fondamentali della facciata del Pantheon - diametro delle colonne (1,495 metri più o meno due centimetri); ampiezza degli intercolumni (3,02 metri più o meno tre centimetri); altezza delle colonne (14,14 metri più o meno un centimetro) - sono in rapporto di 1 a 2 a 9,5.

Questo rapporto è uno di quelli specificati per una facciata ideale da Ermogene, uno dei più celebrati architetti dell'età ellenistica (del quale conosciamo le teorie grazie agli scritti di Vitruvio, architetto e teorico del I secolo a.C.). Per la prima volta nello studio dell'architettura romana si può quindi documentare l'impiego di un canone numerico ideale, noto da una fonte scritta, nella progettazione di un monumento esistente. Oggi turisti e studiosi che visitano il Mausoleo di Augusto passano senza saperlo su una precisa documentazione delle perfette proporzioni del Pantheon.

LOTHAR HASELBERGER detiene la cattedra di architettura romana all'Università della Pennsylvania; dirige inoltre il restauro del tempio di Apollo a Didime, coordinato dall'Istituto archeologico tedesco di Berlino.

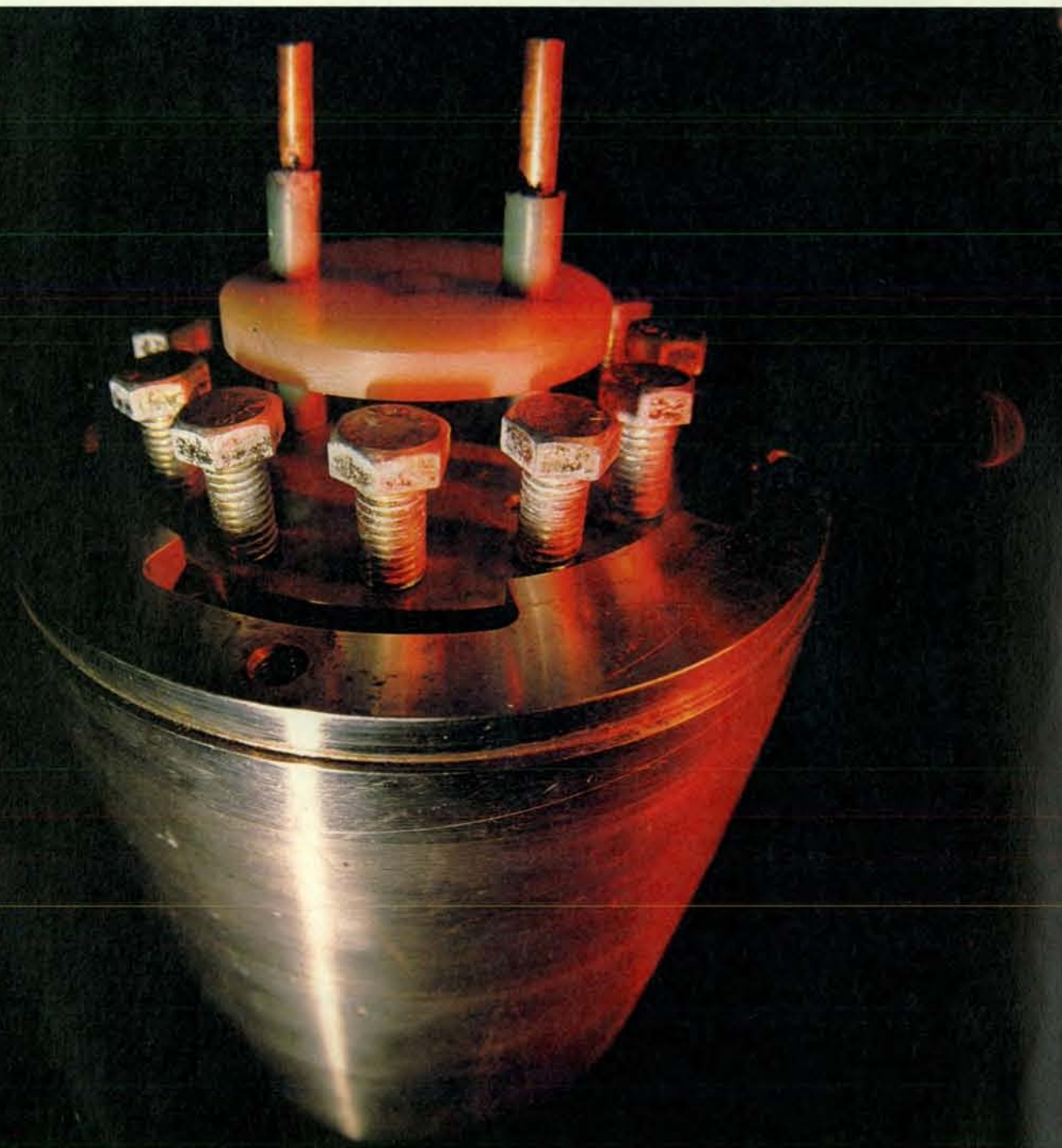
DE FINE LICHT KJELD, *The Rotunda in Rome - A Study of Hadrian's Pantheon*, Jutland Archaeological Society Publications VIII, Nordisk Forlag, Copenaghen, 1968.

HASELBERGER LOTHAR, *Ein Giebelriss der Vorhalle des Pantheon: die Werkrisse vor dem Augustusmausoleum* in «Mitteilungen des Deutschen Archaeologischen Instituts, Roemische Abteilung», vol. 101, Verlag Philipp von Zabern, Magonza, 1994.

La costruzione di magneti superpotenti

Elettromagneti capaci di concentrare un'energia pari a quella di un candelotto di dinamite potranno avere interessanti applicazioni in molti settori della scienza dei materiali e della fisica

di Greg Boebinger, Al Passner e Joze Bevk

Un elettromagnete a impulsi consiste di una bobina di cavo ad alta resistenza posta in un contenitore di acciaio. Questo magnete genera, in un volume di un centimetro cubo nel suo centro, campi che si avvicinano ai 750 000 gauss. I bulloni permettono di mantenere in posto la bobina; le due barre di rame costituiscono i contatti elettrici con la bobina stessa.

La giornata del 3 dicembre 1992 era iniziata in modo abbastanza consueto. Da diversi mesi stavamo studiando il processo attraverso il quale un intenso campo magnetico annulla la superconduttività (la completa assenza di resistenza elettrica che si manifesta in alcuni materiali). Il nostro magnete ad alta intensità, progettato e costruito 11 mesi prima, aveva generato migliaia di impulsi magnetici, ognuno dei quali aveva prodotto un campo oltre un milione di volte più intenso di quello terrestre e aveva concentrato, in una regione di spazio grande quanto un pugno, un fiotto di energia comparabile a quella originata dall'esplosione di un candelotto di dinamite.

Come era nostra abitudine, immergemmo l'elettromagnete in azoto liquido, per ridurre la resistenza elettrica dei suoi avvolgimenti. Il campione sperimentale, uno dei primi superconduttori ad alta temperatura, fu posizionato nel centro del magnete. Chiudemmo e bloccammo la porta del bunker di acciaio che conteneva il magnete, il suo sistema di alimentazione e tutte le nostre apparecchiature per la raccolta dei dati. La sequenza di preparazione portò il sistema di alimentazione a una differenza di potenziale di 7600 volt; poi uno di noi premette il pulsante di accensione e accadde l'imprevisto.

Uno scoppio simile a una fucilata e la fuoriuscita di fiotti di azoto superraffreddato dalle prese d'aria del bunker ci dissero con certezza che il magnete aveva avuto un guasto catastrofico.

Una volta riacquistata la calma, entrammo nel bunker per esaminare i danni. Tutto sommato, poteva andare peggio. Nel 1988, mentre sperimentavamo i nostri primi modelli di magnete a impulsi usando un sistema di alimentazione e un laboratorio gentilmente messi a nostra disposizione da un collega in Belgio, ripagammo la sua ospitalità con un collasso del magnete che provocò una violenta pioggia di frammenti di acciaio in tutta la stanza. Questa volta invece il rivestimento del magnete era rimasto intatto, sebbene le forze meccaniche generate dal campo avessero spaccato gli otto bulloni di acciaio che tenevano fisso il magnete. Le stesse forze avevano inoltre sollevato e rovesciato il magnete, che pesava 27 chilogrammi ed era più grande di una tanica di vernice, distruggendo alcune apparecchiature vicine e piegando una lastra di alluminio del pavimento spessa più di un centimetro. Non abbiamo mai più trovato il campione che stavamo studiando.

Ma perché noi, e i nostri colleghi in una ventina di laboratori sparsi per il mondo, ci siamo avventurati in una simile impresa? La corsa per costruire elettromagneti sempre più potenti costituisce una sfida significativa che favorisce lo sviluppo di nuovi materiali, sia conduttori sia isolanti, allo scopo di superare gli attuali limiti di intensità, duttilità e prestazioni elettriche. Inoltre la costruzione di questo tipo di magneti è in realtà il mezzo, non il fine, delle ricerche condotte in molti laboratori. La generazione di campi magnetici estremamente intensi apre molteplici possibilità, dallo sviluppo di magneti permanenti più potenti allo studio del complesso comportamento degli elettroni nei materiali avanzati, ciascuno dei quali rappresenta una nuova manifestazione dell'elettromagnetismo.

Condensatori ad alta energia riempiono questa stanza e circondano uno degli autori, Al Passner. I 24 condensatori (*uno dei quali è la scatola verticale bluastra visibile in basso a destra*) immagazzinano il mezzo milione di watt al secondo di energia che viene iniettato in un elettromagnete, in un singolo impulso di durata inferiore al decimo di secondo. La mole del sistema di alimentazione fa sembrare piccolo l'elettromagnete accanto a Passner. Durante il funzionamento esso viene immerso in un bagno di azoto liquido in una stanza che si trova sopra quella mostrata nella fotografia, e rimane collegato ai condensatori per mezzo dei grossi cavi neri che si vedono a sinistra. Questo elettromagnete è simile a quello esploso in modo memorabile in Belgio nel 1988.

I magneti permanenti sono un componente essenziale di motori elettrici e altoparlanti, e il loro miglioramento ha permesso di miniaturizzare e rendere portatili questi prodotti. Ci sono numerosi tipi di motori elettrici, ma in tutti il movimento meccanico è conseguenza dell'interazione tra correnti elettriche e campi magnetici. Magneti permanenti più potenti consentono di realizzare motori più piccoli, resistenti e leggeri, particolarmente preziosi per quelle applicazioni che richiedono portabilità ed elevate prestazioni energetiche, come per esempio i robot mobili e i lettori di dischi dei calcolatori *laptop*. L'interazione controllata tra magneti permanenti ed elettromagneti è cruciale anche per la realizzazione di altoparlanti; circa 10 anni fa la comparsa sul mercato di cuffie audio piccole, leggere e ad alta fedeltà, adatte a piccoli sistemi stereo portatili, fu il risultato dello sviluppo commerciale dei magneti al samario-cobalto.

Questi magneti permanenti sono costituiti da materiali «fortemente» magnetici, e i tipi nuovi o sperimentali vengono usualmente collaudati sottoponendoli all'azione di potenti elettromagneti a impulsi. Queste prove, in cui i nuovi materiali sono soggetti a impulsi magnetici, permettono di stabilire quanto intensamente e permanentemente essi possano venire magnetizzati. I materiali «fortemente» magnetici si distinguono da quelli «debolmente» magnetici, i quali cambiano facilmente la propria magnetizzazione e che hanno trovato ampia applicazione in prodotti come i nastri per la registrazione su cassetta, i dischi rigidi dei calcolatori e i floppy disk.

I magneti superpotenti hanno anche applicazioni più esoteriche, come l'impiego nei treni ad alta velocità a levitazione magnetica e nei sistemi per il lancio di missili mediante campi magnetici a impulsi. Nei reattori sperimentali per la fusione nucleare potenti magneti a impulsi confinano il plasma destinato alla fusione; la temperatura di quest'ultimo è infatti troppo elevata perché possa essere contenuto in un qualsiasi reci-

piente solido. Alcune delle applicazioni più affascinanti degli elettromagneti a impulsi prevedono il loro uso in esperimenti di fisica particolarmente sensibili, da eseguire in ambienti ostili. Una descrizione adeguata di questi esperimenti richiede, però, un minimo di conoscenze di base e di prospettiva storica.

I magneti permanenti sono una manifestazione macroscopica del minuscolo campo magnetico che accompagna ogni elettrone ed è associato al suo spin (rotazione). Nessuno ha mai dimostrato che l'elettrone «ruoti» realmente; la prosaica terminologia serve solo a ricordare che, se esso fosse una piccola sfera con carica negativa, dovrebbe ruotare su se stesso per generare il campo magnetico osservato. Tutti i materiali contengono circa 10^{24} elettroni per centimetro cubo, ma nella maggior parte di essi lo spin elettronico punta in direzioni casuali, sicché i campi magnetici si elidono l'uno con l'altro. Nei magneti permanenti, invece, gli spin elettronici sono allineati - in una percentuale generalmente compresa tra l'1 e il 10 per cento - all'interno di piccole regioni chiamate dominî magnetici. Ogni dominio agisce come un microscopico magnete permanente costituito dai campi associati ai singoli elettroni. Con i materiali adatti, un trattamento appropriato e un po' di fortuna, si può far sì che i campi di ciascuno di questi dominî si allineino e resistano ai cambiamenti, dando origine a intensi magneti permanenti. La strada che porta a magneti permanenti sempre più potenti passa dunque attraverso l'allineamento del maggior numero possibile di spin elettronici.

Questi frammenti di bobine provengono da piccoli avvolgimenti a sei strati usati per collaudare nuovi conduttori e analizzare i guasti degli elettromagneti. I frammenti a sinistra e in basso sono stati tagliati con una sega per essere mostrati in sezione; gli altri due sono stati spaccati violentemente dalle forze magnetiche per un guasto catastrofico.

Sebbene si sapesse dell'esistenza del magnetismo già più di 2000 anni fa, all'epoca cioè delle civiltà greca e romana, solo 175 anni fa si comprese che elettricità e magnetismo sono le due componenti di una sola forza, quella elettromagnetica. Nel 1821 il fisico francese André-Marie Ampère dimostrò che il magnetismo è provocato dal moto di cariche elettriche. Egli comprese che un avvolgimento di filo in cui scorre corrente elettrica produce un campo magnetico che emerge da una delle estremità della bobina ed entra nell'altra, proprio come fa il campo magnetico di un magnete permanente. In un elettromagnete di questo tipo, il campo risulta più intenso nel centro della bobina.

Prima del 1825, Ampère e il fisico inglese Michael Faraday avevano studiato indipendentemente le forze meccaniche a cui sono soggetti i fili portatori di corrente immersi in un campo magnetico. Queste forze sono sfruttate in tutti i motori elettrici, da quello enorme di una locomotiva a quello minuscolo che muove le lancette di un orologio al quarzo; e sono state proprio queste forze a distruggere il nostro magnete il 3 dicembre 1992.

Non solo gli elettroni in moto generano campi magnetici ma, come scoprirono Ampère e Faraday, i campi magnetici esercitano forze sulle cariche elettriche che si muovono. Nella maggior parte dei campioni con cui si ha a che fare, queste cariche sono elettroni, che nei metalli si muovono liberamente, mentre nei materiali isolanti sono confinati su orbite limitate centrate su un certo nucleo atomico. I campi magnetici interagiscono con entrambi i tipi di moto orbitale degli elettroni; inoltre un campo magnetico esterno fa sì che gli spin si allineino. Quindi i campi magnetici interagiscono sia con il moto orbitale sia con lo spin degli elettroni del materiale studiato.

In base a questi principi, i magneti superpotenti possono essere considerati strumenti sperimentali utilissimi. La superconduttività, per esempio, è il risultato della formazione di coppie di elettroni i cui spin sono allineati in direzioni opposte. Queste coppie di elettroni, tenute unite da una specifica energia di legame, si muovono attraverso il superconduttore senza incontrare resistenza. Un campo magnetico sufficientemente intenso può però fornire abbastanza energia da spezzare il legame, distruggendo così la superconduttività. Questo fenomeno è di aiuto ai ricercatori, che spesso desiderano studiare il comportamento a basse temperature di questi materiali in assenza di superconduttività. Poiché molti dei superconduttori ad alta temperatura conservano la superconduttività anche se sottoposti a campi magnetici intensi, i magneti a impulsi, capaci di generare campi di intensità straordinaria, sono i soli a offrire l'opportunità di eseguire questo tipo di esperimenti.

Quanto più è intenso il campo magnetico applicato, tanto più alte sono le energie alle quali si può studiare il comportamento degli elettroni. Certi fenomeni elettronici possono essere indotti solo da campi magnetici straordinariamente intensi. A queste intensità, gli effetti sul comportamento elettronico possono essere drastici: si può avere per esempio la soppressione della superconduttività o la conversione di un isolante in un metallo. Tale trasformazione può presentarsi in modo improvviso, una volta che l'energia del campo che fa da sonda divenga confrontabile - ossia risuoni - con una specifica energia caratteristica del materiale, come può essere l'energia di legame nel superconduttore.

Un altro esempio si presenta nella fisica dei semiconduttori. Quando le dimensioni dei dispositivi a semiconduttore si avvicinano a 0,1 micrometri, gli elettroni al loro interno diventano così confinati da non poter più trasportare una quantità arbitraria di energia. Come gli elettroni di un atomo, essi sono costretti a occupare livelli discreti di energia che possono essere traslati o scissi in più livelli da un campo magnetico esterno. Gli intervalli tra questi livelli di energia si misurano applicando intensi campi magnetici e osservandone gli effetti su certe caratteristiche fisiche del materiale, soprattutto la resistenza elettrica o l'assorbimento di luce. Un improvviso aumento dell'assorbimento indica che è stata raggiunta una risonanza tra gli intervalli variabili che separano i livelli energetici degli elettroni e l'energia della sonda ottica. Grazie agli esperimenti con i campi magnetici si è pervenuti a una migliore comprensione del comportamento dei piccoli dispositivi a semiconduttore e persino alla scoperta di fenomeni completamente nuovi connessi al campo magnetico.

Ma quando si considera molto intenso un campo magnetico? La unità di misura per l'intensità del campo magnetico è il gauss, e come riferimento si può considerare che l'intensità del campo magnetico terrestre è circa mezzo gauss, quella dei magneti a base di ferro dei comuni frigoriferi è qualche centinaio di gauss, mentre quella dei magneti permanenti più potenti, come i magneti a samario-cobalto o a neodimio-ferro-boro, va da 3000 a 4000 gauss.

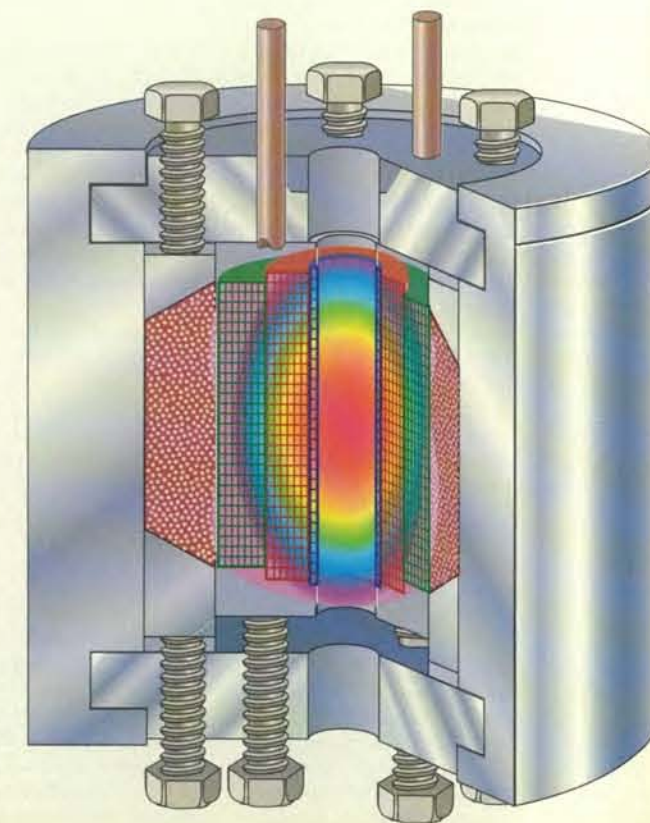
Benché siano certamente da prevedere progressi nel campo dei magneti permanenti, tuttavia l'intensità massima che essi potranno raggiungere è probabilmente limitata intorno a 30 000 gauss, semplicemente perché esiste un limite alla densità degli elettroni con spin allineati. La costruzione di un magnete di dimensioni maggiori consente di aumentare non l'intensità del campo, ma piuttosto la sua estensione nello spazio. Perciò per produrre campi veramente intensi occorrono gli elettromagneti, il cui magnetismo è una semplice conseguenza del moto di cariche elettriche.

Nel nostro laboratorio abbiamo ottenuto campi magnetici di 730 000 gauss. (Per valutare quanto questo risultato sia in realtà modesto basta pensare che in natura, e precisamente sulla superficie delle stelle di neutroni, esistono campi magnetici di 10^{12} gauss.) Per generare campi così intensi in laboratorio è necessario un impulso di corrente elettrica nell'elettromagnete che superi momentaneamente la quantità di corrente che fluisce attraverso 15 000 lampade da 100 watt. Poiché le forze magnetiche che si esercitano sui cavi conduttori di corrente sono proporzionali al prodotto tra la corrente elettrica e l'intensità del campo magnetico, i nostri cavi subiscono una pressione distruttiva che supera i 14 000 chilogrammi per centimetro quadrato (pari a oltre 35 volte quella esercitata sul fondo oceanico da una colonna di 4000 metri d'acqua). Nonostante queste difficoltà, i magneti generalmente resistono a migliaia di impulsi; tuttavia anche le occasionali rotture esplosive non sono prive di un certo fascino pirotecnico.

In linea di principio, un elettromagnete può generare un campo illimitato; una corrente infinita produrrebbe un campo magnetico infinitamente intenso. In pratica, però, la natura non è così compiacente. Quando il campo supera il mezzo milione di gauss, le forze esercitate sui cavi conduttori di corrente oltrepassano il carico di rottura del rame temprato. È la resistenza meccanica del conduttore che di solito limita il campo raggiungibile, e ciò fa sì che la costruzione di magneti rappresenti una vera e propria fucina per lo sviluppo e il collaudo di nuovi conduttori altamente resistenti.

La forza meccanica prodotta dal campo magnetico non è il solo ostacolo. Una quantità enorme di calore è generata nel cavo dalla corrente elettrica necessaria a produrre il campo. Tutti i materiali, a eccezione dei superconduttori, oppongono al flusso di corrente una resistenza che converte parte dell'energia elettrica in calore; in uno dei nostri magneti questo può superare i 10 milioni di watt, un valore sufficiente a fondere in meno di un secondo i cinque chilogrammi di rame del magnete.

La progettazione di magneti superpotenti segue vie diverse per affrontare i problemi del calore e della sollecitazione meccanica. Questi dispositivi si dividono in due ampie classi: i magneti azionati da corrente continua e i magneti a impulsi, ai quali l'energia è fornita da un breve impulso di corrente. I magneti a impulsi, che possono essere ulteriormente suddivisi in tipi distruttivi e non distruttivi, cercano di aggirare il problema del calore eccessivo limitando la durata dell'impulso magnetico a meno di un secondo. I magneti a impulsi del tipo distruttivo ignorano anche il problema della sollecitazione meccanica, dato che devono essere sottoposti a un singolo impulso al quale non sopravvivono mai intatti. L'impulso dura solo pochi microsecondi prima che un'onda d'urto mecca-

L'intensità del campo magnetico, rappresentata a destra con i colori dell'iride, è maggiore nella zona rossa al centro della bobina dell'elettromagnete, dove vengono collocati i campioni. Le sezioni trapezoidali che circondano gli avvolgimenti contengono granuli di ossido di zirconio, i quali sorreggono la bobina pur permettendo all'azoto liquido di raffreddarla. Infine, l'intera struttura è contenuta in un recipiente di acciaio e viene posta sotto pressione stringendo i bulloni. Le sollecitazioni cui è soggetto il cavo del magnete (*riportato qui sopra su una sezione della bobina*) sono massime negli strati intermedi della bobina, per i quali viene usato il conduttore meccanicamente più resistente, un cavo di rame-niobio (*mostrato in rosso*).

Verso il megagauss

La generazione di campi magnetici a impulsi sempre più intensi solleva alcune questioni ovvie. Fino a che punto si può arrivare? Quali sono le limitazioni principali? Ci sono sufficienti possibilità di miglioramento da giustificare ulteriori ricerche? Le risposte a queste domande dipendono interamente dalla scienza dei materiali, e in particolare dalla conoscenza di come essi si deformino e infine cedano sotto uno sforzo, di come possano essere resi più resistenti e di come interagiscano le loro proprietà meccaniche ed elettriche.

Si consideri un cavo di rame che viene tirato: esso si rompe quando la sollecitazione supera il prodotto tra la forza di un singolo legame atomico e il numero di legami atomici per unità di area. Questo calcolo porta a una resistenza teorica per il rame di 24 500 chilogrammi per centimetro quadrato. Eppure il rame si deforma e si rompe se sottoposto a sollecitazioni di gran lunga inferiori; in effetti i metalli puri spesso iniziano a deformarsi a meno dell'1 per cento della loro resistenza teorica.

Come si spiega questo comportamento enigmatico? Per dirlo in breve, con le dislocazioni. Scoperte circa 60 anni fa, esse sono lunghe schiere, o file, di difetti dove gli atomi non sono disposti in modo perfetto e ordinato come altrove nel reticolo cristallino. La deformazione plastica di tutti i solidi cristallini, metalli inclusi, è legata al movimento di queste dislocazioni attraverso il reticolo. Va notato che non è necessario che tutti i legami atomici in un piano si rompano simultaneamente perché le dislocazioni si muovano. Proprio a causa di questi difetti, il materiale si può deformare per rottura e riformazione di una singola fila di legami atomici lungo la linea di dislocazione, in un processo che si può paragonare allo spostamento di un grande e pesante tappeto mediante la propagazione di un'increspatura da un'estremità all'altra. Questo tipo di deformazione richiede molta meno energia di quanta ne occorra per sottoporre a deformazione da taglio un cristallo privo di dislocazioni.

I tentativi coronati da successo di aumentare la resistenza meccanica dei materiali cristallini si sono concentrati per lo più nell'impedire il movimento delle dislocazioni, inserendo difetti immobili all'interno del reticolo cristallino. Tali difetti possono essere introdotti in un cristallo in modi diversi: miscelando un secondo elemento in modo da formare una lega, introducendo precipitati, come piccole particelle di ossido di alluminio o di ossido di berillio, o ancora generando un tale groviglio di dislocazioni che esse finiscono per intralciarsi reciprocamente. In generale, la resistenza meccanica aumenta al crescere della densità degli ostacoli.

Sfortunatamente per i nostri fini, un aumento della densità di questi ostacoli interferisce non solo con il movimento delle dislocazioni, ma anche con quello degli elettroni, causandone la diffusione e una conduzione di corrente meno efficiente. Una grande densità di difetti riduce anche la duttilità, che richiede un notevole movimento delle dislocazioni. Perciò, in generale, quanto più è grande l'aumento di resistenza meccanica, tanto maggiore è la perdita di conduttività e duttilità.

Già da qualche tempo si è capito che un materiale debole, come per esempio una resina epossidica, può essere rinforzato inserendovi filamenti più resistenti, come fibre di vetro, grafite o boro, in modo da formare un materiale composito. I materiali compositi tradizionali devono la loro resistenza alla presenza dei filamenti. In anni recenti è apparsa una nuova famiglia di questi materiali dotati di elevata resistenza, i materiali compositi conduttori «formati *in situ*». Essi si caratterizzano per i filamenti molto più ravvicinati e sottili (*si vedano le microfotografie in questa pagina*). Questi minuscoli nastri hanno uno spessore inferiore al milionesimo di centimetro (oltre 5000 volte meno di un capello umano). Poiché il movimento delle dislocazioni è reso estremamente difficoltoso dalla presenza di filamenti così sottili, il materiale si avvicina al valore massimo teorico della sua resistenza. In realtà, questi nuovi materiali compositi possono risultare anche più resistenti dei loro filamenti di rinforzo; inoltre basta una frazione relativamente piccola di filamenti per ottenere questo aumento spettacolare della resistenza. Per esempio, nel conduttore super-resistente a rame-niobio, i filamenti di niobio occupano solo il 18 per cento del volume. Ciò consente di mantenere l'alta conduttività del rame.

Si può ottenere la combinazione più favorevole di resistenza, duttilità e conduttività in questi materiali compositi variando la dimensione e la spaziatura dei filamenti. Campioni sperimentali si sono avvicinati a un valore di 22 400 chilogrammi per centimetro quadrato, il doppio della resistenza dei cavi di rame-niobio usati nei nostri magneti. Simili miglioramenti nelle prestazioni dei conduttori fanno sperare che il campo magnetico di picco raggiungibile con i magneti non distruttivi a impulsi possa avvicinarsi al milione di gauss.

Un groviglio di filamenti ultrafini di niobio incorporati nel rame aumenta la resistenza di 10 volte.

nica, in moto a una velocità prossima a quella del suono, annienti il magnete.

A causa dei loro costi elevati, i più potenti magneti a corrente continua si trovano solo in pochissimi laboratori a finanziamento statale. L'energia viene loro fornita da sottostazioni elettriche di dimensioni tali da poter alimentare una piccola città. Un sistema idraulico impressionante fa circolare acqua deionizzata e altamente pressurizzata attraverso i magneti per raffreddarli. Questi dispositivi possono funzionare per molte ore di seguito e il loro consumo di corrente elettrica può superare i 1000 dollari all'ora. Recentemente il nuovo National High Magnetic Field Laboratory di Tallahassee ha ottenuto 300 000 gauss, un record per un elettromagnete a corrente continua convenzionale (resistivo).

Gli elettromagneti a superconduttori evitano il problema del riscaldamento. Per mantenere la superconduttività, in genere si utilizzano questi magneti a una temperatura di 4,2 kelvin (– 269 gradi Celsius), immergendoli in elio liquido. Il principale inconveniente dei magneti a superconduttori è che il loro campo, se sufficientemente intenso, interferisce con la superconduttività dei cavi che costituiscono gli avvolgimenti. Per questa ragione i magneti a superconduttori non sono andati oltre i 200 000 gauss.

In numerosi laboratori, comunque, essi sono stati combinati con magneti resistivi a corrente continua allo scopo di creare un modello ibrido, con l'elemento resistivo collocato all'interno di uno più grande a superconduttori. Un magnete ibrido realizzato presso il Francis Bitter National Magnet Laboratory del Massachusetts Institute of Technology detiene il record - 385 000 gauss - per tutti i tipi di magneti a corrente continua.

I magneti a impulsi generano campi magnetici ancora più forti. Un modello distruttivo si è avvicinato ai 10 milioni di gauss con l'aiuto di potenti esplosivi, i quali hanno compresso simmetricamente il campo magnetico in un volume molto ristretto centrato sul campione (un tipo di implosione assai simile a quella che avvia la reazione di fissione veloce in una bomba atomica). Con questo metodo, l'intero dispositivo e il campione vengono ovviamente vaporizzati; non sorprende allora che i due laboratori statali specializzati in questo tipo di progetto siano il Los Alamos National Laboratory nel New Mexico e il suo corrispettivo russo ad Arzamas.

Un modello alternativo di magnete distruttivo, realizzato al Megagauss Laboratory di Tokyo, è particolarmente conveniente perché di rado il campione viene danneggiato dall'esplosione del magnete. Il progetto è semplice ed elegante: la bobina è costituita da un singolo anello di rame che genera un campo di 1,5 milioni di gauss nei pochi microsecondi che ha a disposizione prima di spaccarsi irrimediabilmente. Il principale problema relativo alla protezione dell'apparecchio consiste nell'intercettare le schegge, un compito affidato a tavole di legno compensato opportunamente disposte.

Sebbene siano meno spettacolari nel loro funzionamento, i magneti non distruttivi a impulsi presentano considerevoli vantaggi. Per esempio, rendono possibile una varietà di esperimenti molto più ampia, poiché la durata dell'impulso può aumentare anche di 10 000 volte, fino a un intervallo che va da 10 a 100 millisecondi. Inoltre essi consentono un miglior controllo sulla forma dell'impulso e intervalli più brevi (anche di soli 20 minuti) tra impulsi successivi. Tutte queste caratteristiche semplificano il compito di determinare la completezza dei dati sperimentali acquisiti durante l'impulso. Infine questi magneti spesso richiedono una infrastruttura di laboratorio più semplice e costi di gestione più bassi, il che li mette alla portata di piccoli gruppi di ricerca. Il prezzo da pagare per questi vantaggi consiste nelle estreme sollecitazioni meccaniche esercitate sul magnete dal campo che esso stesso genera.

Ci sono molti modi diversi di progettare un elettromagnete affinché resista ai traumi dovuti al succedersi degli impulsi. Il nostro fa affidamento su una accurata disposizione di diversi tipi di cavo all'interno di un singolo magnete. Il conduttore ideale per un elettromagnete dovrebbe avere grande resistenza meccanica, duttilità e conduttività; purtroppo la resistenza meccanica di un conduttore va invariabilmente a discapito della conduttività e della duttilità. Perciò abbiamo scelto di combinare opportunamente cavi con differenti proprietà per adattarli alle varie condizioni esistenti all'interno del magnete.

Nei nostri dispositivi il cavo è avvolto in un bobina costituita da 14 strati concentrici, ognuno dei quali ha circa 30 cappi di cavo. L'intensità del campo magnetico è massima nel centro del magnete e diminuisce più o meno linearmente attraverso i 14 strati. Le sollecitazioni meccaniche più intense, d'altro canto, si presentano nel quarto strato a partire dal centro, essendo proporzionali al prodotto tra il campo magnetico locale, la densità di corrente elettrica nel cavo e il raggio dello strato di cavo.

Per costruire i nostri magneti utilizziamo tre diversi conduttori a base di rame. Per gli strati intermedi, che sono quelli maggiormente sottoposti alle sollecitazioni, la nostra scelta è caduta su un cavo composito rame-niobio, il più resistente tra i conduttori disponibili. Esso può resistere alla pressione di 11 550 chilogrammi per centimetro quadrato, superiore a quella sopportabile da molti acciai, che comunque sarebbero troppo fragili e avrebbero una conduttività troppo scarsa per questo tipo di applicazione. Usato per la prima volta al MIT, questo cavo deve la propria resistenza alla densa distribuzione di microscopici filamenti di niobio annegati nel rame. Il modo in cui questi filamenti conferiscono al cavo le sue rimarchevoli proprietà è in sé di grande interesse (*si veda la finestra nella pagina a fronte*).

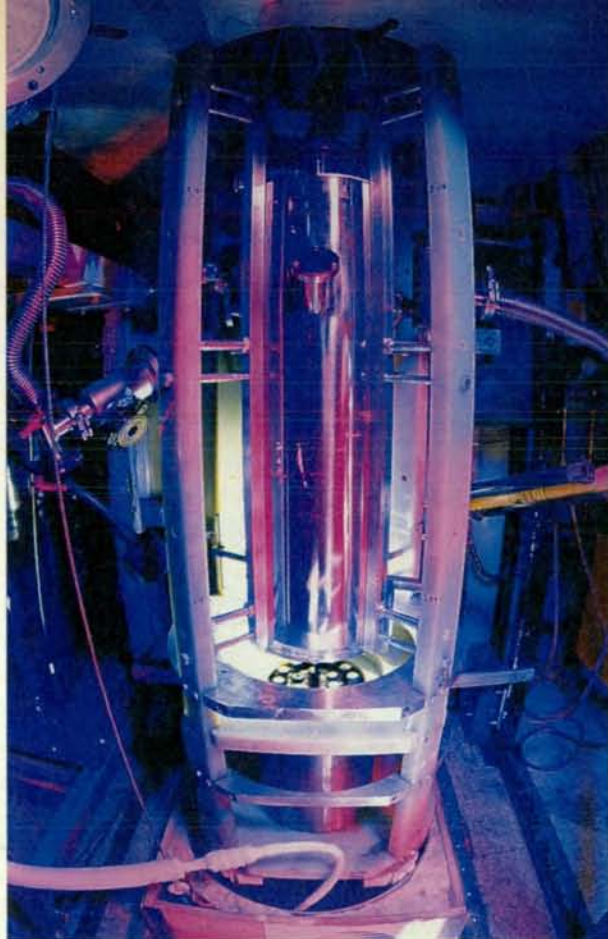
L'accentuata curvatura del primo strato della bobina richiede un materiale molto più duttile del rame-niobio; noi abbiamo scelto una mescolanza di ossidi di rame, nichel e berillio. I sette strati esterni, di diametro più grande, subiscono le minori sollecitazioni, sia durante l'avvolgimento della bobina sia durante il passaggio degli impulsi. Da essi inoltre dipende la resistenza elettrica totale, semplicemente perché contengono la maggior parte del cavo conduttore. Per questi motivi essi sono realizzati con un materiale più debole, l'ossido di rame e alluminio, il quale d'altra parte è un migliore conduttore, è disponibile in grandi quantità ed è tre volte più resistente del rame ordinario.

Una simile configurazione rende le bobine capaci di resistere a pressioni considerevoli. Per ottenere campi magnetici di grande intensità, le bobine dei magneti a impulsi devono distribuire adeguatamente le sollecitazioni. Quando queste forze oltrepassano un certo limite si ha una deformazione permanente del materiale ma, se il conduttore sottoposto a forte tensione è sufficientemente duttile, può «appoggiarsi» allo strato vicino e usarlo come supporto. Noi progettiamo i nostri magneti prevedendo questa possibilità, con l'ausilio

La dislocazione a spigolo, indicata con la X rossa, è dovuta alla presenza di un piano aggiuntivo di atomi in una parte del cristallo. Nella sequenza mostrata, la dislocazione si muove attraverso il materiale via via che i legami chimici indicati in rosso e in viola si spezzano e si riformano uno alla volta. Alla fine, l'intera metà sinistra del cristallo si è spostata in alto. Ripetuto milioni di volte, questo frequente processo porta alla rottura meccanica, cioè alla separazione delle due metà del cristallo.

di un modello al calcolatore messo a punto in collaborazione con Phil Snyder della Princeton University. Effettivamente, a parte i problemi relativi ai materiali, le maggiori difficoltà nella progettazione, nella realizzazione di modelli e nella costruzione di magneti superpotenti riguardano la opportuna distribuzione delle sollecitazioni.

Una strategia di progettazione alternativa per magneti a impulsi è stata perseguita dai nostri colleghi di Leuven in Belgio, i quali utilizzano un singolo tipo di conduttore all'interno del magnete. Ogni strato di conduttore è rinforzato meccanicamente da un sottile strato di supporto fatto di fibra di vetro ad alta resistenza. Questa strategia di progetto separa in un certo senso il compito di generare il campo magnetico da quello di resistere a sollecitazioni elevatissime. Magneti così progettati hanno raggiunto recentemente valori di picco del campo magnetico confrontabili con quelli da noi ottenuti.

Anche i nostri magneti sono rinforzati meccanicamente, ma solo intorno allo strato di conduttore più esterno. L'intera bobina è sostenuta rigidamente in una «scatola» contenente granuli (di un millimetro di diametro) di ossido di zirconio stabilizzato. Questi granuli, fatti di un analogo ad alta resistenza del ben noto materiale che serve per i diamanti sintetici, sono tra i più resistenti isolanti conosciuti. Posti sotto pressione all'interno di un contenitore di acciaio essi forniscono un supporto abbastanza rigido per impedire che un piccolo guasto localizzato - come una semplice rottura del cavo della bobina - possa provocare una catena di eventi catastrofica. Nella maggior parte dei casi, dobbiamo semplicemente svolgere il magnete per scoprire dove e come è avvenuto il guasto. In realtà, l'esplosione del 3 dicembre 1992 è stata l'ultima; oggi i guasti dei magneti sono assai meno spettacolari e lasciano intatte le apparecchiature sperimentali poste al centro del magnete.

Una struttura rigida di supporto fissa l'elettromagnete - all'interno del cilindro di acciaio in basso - e lo collega ai condensatori che sono alloggiati in una stanza sottostante. Il cilindro lucente, lungo quasi quanto la struttura, è un contenitore criogenico che raffredda il campione sottoposto a esperimento e lo guida all'interno del magnete.

Anche con tutti questi dispositivi di rinforzo, far funzionare un magnete a impulsi non distruttivo rimane un procedimento complicato. Dapprima il magnete viene raffreddato a 77 kelvin per immersione in azoto liquido. Questo passaggio fondamentale aumenta di circa il 15 per cento la resistenza alla rottura del conduttore, e nel contempo ne riduce di 2-4 volte la resistività. Una resistività più bassa significa meno energia persa sotto forma di calore. Nonostante ciò, la temperatura del magnete aumenta di circa 200 kelvin durante un impulso, raggiungendo la temperatura ambiente in circa 0,01 secondi (far funzionare un magnete a impulsi a temperatura ambiente significherebbe fondere quasi istantaneamente la bobina). Dopo un impulso, si deve attendere per circa 20 minuti perché l'azoto liquido smetta di bollire violentemente e raffreddi il magnete per l'impulso successivo.

Nei prossimi dieci anni si otterranno probabilmente impulsi magnetici non distruttivi dell'ordine del milione di gauss o più. Una volta superata questa pietra miliare, si può solo immaginare quali nuovi fenomeni fisici si potranno osservare. In passato l'incremento del campo magnetico ha condotto spesso a scoperte completamente impreviste. Gli esperimenti sui materiali magnetici potrebbero provocare la prossima rivoluzione in fatto di magneti permanenti più potenti, mentre quelli sulla superconduttività potrebbero consentire di verificare una previsione teorica tanto entusiasmante quanto poco intuitiva: in alcuni materiali la superconduttività, una volta distrutta da un intenso campo magnetico, potrebbe addirittura essere riattivata da campi ancora più potenti.

I conduttori più resistenti, capaci di raggiungere un milione di gauss, avrebbero a loro volta interessanti applicazioni. Per esempio, potrebbero migliorare drasticamente le prestazioni dei reattori per la fusione di plasma, dato che la produzione di energia è notevolmente facilitata dalla presenza di forti campi magnetici. Inoltre campi a impulsi più intensi aumentano la velocità dei proiettili a propulsione elettromagnetica; questa tecnologia, sviluppata presso i Sandia National Laboratories nel New Mexico, potrebbe un giorno competere con i razzi per il lancio di satelliti nello spazio. Per i campi magnetici intensi, a quanto pare, neppure il cielo è il limite.

GREG BOEBINGER, AL PASSNER e JOZE BEVK svolgono la loro attività di ricerca presso gli AT & T Bell Laboratories di Murray Hill (New Jersey). Boebinger e Passner collaborano nella progettazione, nella costruzione e nell'impiego di elettromagneti a impulsi; Bevk è un esperto sulle proprietà dei materiali compositi con filamenti ultrasottili.

KASTNER MARC A., *Artificial Atoms* in «Physics Today», 46, n. 1, gennaio 1993.

BISHOP DAVID J., GAMMEL PETER L. e HUSE DAVID A., *La resistenza nei superconduttori ad alta temperatura* in «Le Scienze» n. 296, aprile 1993.

VERSCHUUR GERRIT L., *Hidden Attraction: The History and Mystery of Magnetism*, Oxford University Press, 1993.

BOEBINGER G. S., PASSNER A. e BEVK J., *Seventy-Two Tesla Non-Destructive Pulsed Magnetic Fields at AT&T Bell Laboratories* in «Physica B», 201, luglio-agosto 1994.

CAMPBELL PETER, *Permanent Magnet Materials and Their Design*, Cambridge University Press, 1994.

Riconoscere i parenti

Molti organismi, dai tunicati ai primati, riescono a identificare i loro affini: capire come e perché lo facciano conduce a considerare in modo nuovo l'evoluzione del comportamento sociale

di David W. Pfennig e Paul W. Sherman

La rondine riparia o topino identifica dapprima la prole basandosi sulla localizzazione del nido. I genitori ricordano il luogo in cui hanno scavato la buca per le uova e alimentano indistintamente qualunque piccolo vi trovino. Poiché i rondinotti rimangono generalmente nel nido dei genitori, gli adulti alimentano solo i propri figli. Una volta che questi hanno imparato a volare, li riconoscono dalla voce.

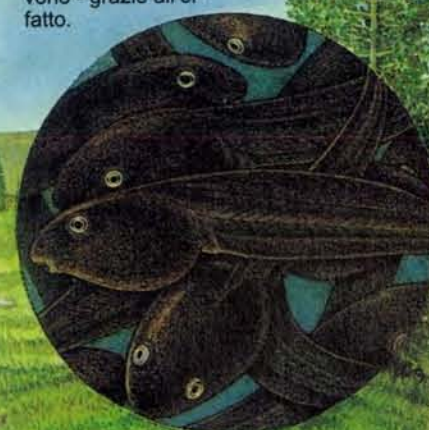
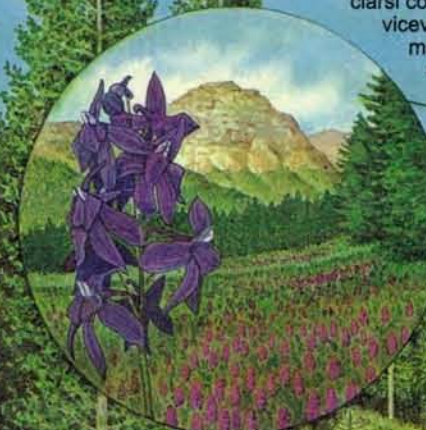
Il cinomio di Belding vive in gruppi in cui si ha un'estesa cooperazione tra madri, figlie e sorelle. Basandosi sull'olfatto, i cinomi possono distinguere i compagni di nido, che sono parenti stretti e con i quali hanno dimestichezza, da coloro che non vivono nel nido. Possono anche discriminare tra sorelle e sorellastre.

La piantaggine minore e altre piante selvatiche crescono più rapidamente in presenza di loro affini che non di piante della stessa specie non imparentate. Per distinguere le piante affini gli organismi vegetali probabilmente si servono di segnali chimici emessi dalle radici.

L'affinità è un principio fondamentale nell'organizzazione di qualunque società. Gli esseri umani possiedono mezzi elaborati con i quali identificare i consanguinei: ricorrono, per esempio, all'uso dei cognomi e conservano alberi genealogici particolareggiati. Ma meccanismi per distinguere i propri parenti esistono anche nel regno vegetale e in quello animale, dagli organismi più semplici ai più complessi. Comprendere l'origine e i meccanismi del riconoscimento della parentela consente di vedere sotto una luce diversa eventi tanto disparati come la scelta del partner sessuale, l'apprendimento e il funzionamento del sistema immunitario.

L'attuale interesse verso il riconoscimento della parentela può essere fatto risalire a due teorie. Nel 1964 William D. Hamilton dell'Università di Oxford aveva osservato che, nella competizione per la sopravvivenza e la propagazione dei geni,

Le vespe cartonaie si basano sull'olfatto per determinare se i visitatori sono parenti. I membri di una colonia hanno un odore caratteristico dovuto al particolare miscuglio di fibre vegetali con cui è costruito il nido.

I girini di rospo del nord si riuniscono in banchi, costituiti tutti da fratelli e sorelle che si riconoscono tra loro - così come riconoscono l'ambiente in cui vivono - grazie all'olfatto.

Le speronelle distinguono gli affini dai non affini in base al polline. Il riconoscimento della parentela serve per evitare di incrociarsi con parenti troppo stretti o, viceversa, con piante estremamente diverse per costituzione genetica.

Il picchio delle ghiande costruisce nidi comunitari dove vivono molte sorelle. Una femmina rimuove le uova delle sorelle e le distrugge finché non comincia essa stessa a deporre uova. Essa si basa su questi segnali temporali per stabilire quali uova non sono sue. Dopo che ha cominciato a deporre le uova, non distingue più le proprie da quelle estranee, e non danneggia più le uova nel nido.

Le api scavatrici, per difendere i loro nidi sotterranei, devono poter riconoscere gli affini dai non affini. All'ingresso di ogni colonia un'ape operaia sta di guardia. Quando un'altra ape si avvicina, la sentinella determina con l'olfatto se la visitatrice è conosciuta, e quindi affine, e la lascia entrare.

I tunicati sono animali marini privi di encefalo; nonostante ciò essi riescono a identificare i loro affini servendosi per il riconoscimento di segnali chimici. Le associazioni coloniali si stabiliscono soltanto se gli individui che vi partecipano sono imparentati tra loro.

l'evoluzione non fa alcuna distinzione tra gli alleli (forme alternative di geni) trasmessi attraverso i discendenti diretti, cioè i figli, e quelli trasmessi attraverso consanguinei diversi dai discendenti diretti, come i fratelli. Mentre, secondo il pensiero tradizionale, la selezione naturale favorisce gli individui che producono il maggior numero di figli, Hamilton ha spostato l'enfasi sui geni e ha concluso che la selezione naturale deve favorire quegli organismi che aiutano un loro affine, qualunque esso sia, perché, così facendo, accrescono la loro rappresentanza genetica totale.

Hamilton ha dato a questo suo concetto il nome di *fitness* (idoneità) complessiva, perché include sia i geni che un organismo trasmette attraverso i figli, sia le copie di quei geni che esso contribuisce a propagare in parenti che sono in grado di riprodursi. La teoria dell'idoneità complessiva può spiegare l'evoluzione dell'altruismo, per esempio negli insoliti casi in cui alcuni membri di certe specie - come la formica, l'ape o l'eterocefalo glabro - non si riproducono, ma si dedicano esclusivamente ad accudire i loro parenti (si veda l'articolo *L'eterocefalo glabro* di Paul W. Sherman, Jennifer U. M. Jarvis e Stanton H. Braude in «Le Scienze» n. 290, ottobre 1992).

Una seconda interpretazione, la teoria dell'esoincrocio ottimale, è stata presentata all'inizio degli anni settanta da Patrick Bateson dell'Università di Cambridge e da William M. Shields del SUNY College of Environmental Science and Forestry a Syracuse. Questa ipotesi si basa sul fatto ben noto che l'inincrocio praticato tra consanguinei molto vicini, per esempio tra fratello e sorella, provoca spesso la comparsa di caratteri nocivi nella prole. Tutti gli organismi possiedono alcuni alleli dannosi, normalmente non espressi. È probabile che le stesse versioni rare di questi geni siano presenti anche nei parenti stretti. In caso di inincrocio tra costoro, la prole può ereditare questi alleli da entrambi i genitori, il che consente loro di esprimere il carattere svantaggioso. Ma anche l'accoppiamento tra individui molto diversi sotto il profilo genetico può produrre effetti nocivi in quanto elimina combinazioni geniche che si sono dimostrate positive. La teoria dell'esoincrocio ottimale spiega perché molti organismi preferiscano accoppiarsi con partner che non siano né troppo vicini né troppo lontani come parentela.

Due forme di riconoscimento

Lavori più recenti hanno fornito qualche ulteriore elemento in grado di spiegare il riconoscimento degli affini. Le ragioni evolutive che hanno portato allo sviluppo di questa capacità sono, però, soltanto una parte della storia, sulla quale ritorneremo in seguito. Ci occuperemo prima di una questione interessante: come fanno gli organismi a distinguere i parenti? In generale, piante e animali utilizzano due meccanismi per identificare gli affini. In certi casi i caratteri fisici, cioè il fenotipo, consentono un riconoscimento immediato della parentela. Altrimenti l'identificazione può avvenire in modo indiretto, senza riferimento ai fenotipi, ma mediante indizi correlati al tempo o al luogo.

Alcuni organismi fanno ricorso a una combinazione di metodi diretti e indiretti. Per esempio, la rondine riparia o topino (*Riparia riparia*), che nidifica in colonie sulle prode sabbiose, identifica la prole servendosi di entrambi i sistemi. John L. Hoogland dell'Università del Maryland e uno di noi (Sherman) hanno scoperto che le rondini riparie, in veste di genitori, alimentano qualunque uccellino si trovi nel loro nido. Questo comportamento sta a indicare che i genitori identificano i loro piccoli in maniera indiretta, imparando a riconoscere la posizione della buca che hanno scavato nella sabbia. I piccoli incapaci di volare generalmente rimangono nel nido fino a tre settimane dopo la schiusa; pertanto in questo periodo i genitori generalmente alimentano soltanto i loro figli. Però, dopo che i piccoli hanno imparato a volare, le nidiate si mescolano ampiamente; a questo punto i genitori devono ricorrere a segnali diretti per poter essere sicuri di continuare a provvedere soltanto ai propri figli. Michael D. Beecher e i suoi collaboratori dell'Università di Washington hanno osservato che i piccoli di rondine riparia, quando arrivano a 20 giorni di età, emettono segnali vocali caratteristici che consentono loro di essere riconosciuti dai genitori.

Per capire come avvenga questa discriminazione, il processo del riconoscimento della parentela è stato suddiviso in tre componenti. Per prima cosa, un individuo produce un segnale che serve per il riconoscimento. Successivamente un altro individuo percepisce il segnale, lo interpreta e mette in atto la risposta appropriata. Nel riconoscimento indiretto il segnale è esterno alla pianta o all'animale; in quello diretto esso è prodotto dall'organismo stesso. Le comunità di animali sociali, nelle quali affini e non affini frequentemente si mescolano, sono particolarmente portate a utilizzare il metodo diretto. Gli scienziati hanno così cominciato a interessarsi alle complesse interazioni che hanno luogo nel processo di riconoscimento diretto della parentela.

Un segnale di riconoscimento diretto può essere costituito da un qualsivoglia carattere fisico che possa essere correlato in modo affidabile con la parentela. I segnali di questo tipo differiscono molto da specie a specie. I riferimenti visivi sono comuni tra quegli animali, come per esempio i primati, il cui senso più importante è la vista. Gli organismi che devono attrarre i propri partner sessuali da una certa distanza, e per di più nell'oscurità, come le rane, si servono viceversa di segnali acustici. E naturalmente le sostanze odorose sono segnali distintivi importanti per un gran numero di animali.

In generale, i segnali chimici trasmettono l'informazione con accuratezza pur richiedendo uno sforzo minore per essere prodotti rispetto ad altri segnali, particolarmente quelli acustici. In effetti, un organismo deve impegnare una considerevole quantità di energia per comprimere l'aria che serve a dare origine a un suono, mentre i segnali chimici richiedono spesso solo poche molecole di una sostanza che l'organismo produce spontaneamente durante le attività quotidiane.

Inoltre gli animali hanno già a disposizione un sistema per scoprire e decifrare le sostanze chimiche: i segnali di questo tipo vengono interpretati prontamente dal sistema immunitario. Secondo alcuni è possibile che il meccanismo fisiologico utilizzato nel riconoscimento della parentela sia stato acquisito dal sistema immunitario nel corso dell'evoluzione.

La fonte dei segnali

Le «etichette» per il riconoscimento differiscono non solo in funzione dell'organo di senso che devono stimolare, ma anche in funzione della loro provenienza. Questi segnali possono riflettere caratteri genetici specifici, possono essere stati acquisiti dall'ambiente, oppure possono avere entrambe le origini. Studi effettuati su certi tunicati, in particolare su *Botryllus schlosseri*, dimostrano che questi animali marini identificano i loro affini attraverso segnali genetici. Essi sono privi di cervello, a riprova del fatto che il riconoscimento della parentela non dipende dalla complessità mentale.

I tunicati si sviluppano a partire da larve planctoniche che poi si fissano sugli scogli e si moltiplicano per via asessuale, formando una colonia i cui componenti, geneticamente e strutturalmente identici, sono interconnessi. Di tanto in tanto due colonie tentano di fondersi. Gli organismi di maggiori dimensioni sopravvivono meglio di quelli piccoli e, pertanto, l'unirsi ad altri può rivelarsi chiaramente vantaggioso. Richard K. Grosberg e James F. Quinn dell'Università della California a Davis hanno scoperto che, se le larve si fissano vicino a organismi geneticamente simili, si possono fondere con essi. Se invece un tunicato tenta di unirsi a una colonia non affine, i componenti di questa seconda colonia emettono sostanze tossiche che respingono l'invasore.

Grosberg e Quinn hanno anche determinato sui cromosomi l'area che controlla la risposta di riconoscimento: hanno notato, infatti, che le larve si fissano vicino a colonie i cui componenti hanno lo stesso allele nel sito del complesso di istocompatibilità. Questa regione del cromosoma codifica per quelle sostanze che, come parte del sistema immunitario, consentono a un organismo di distinguere il sé dal non sé. I due ricercatori hanno anche trovato che i tunicati si possono fissare vicino ad altri tunicati non affini, purché questi siano stati manipolati geneticamente in laboratorio allo scopo di ottenere la stessa versione del gene nella posizione chiave; viceversa, tendono a non fissarsi vicino a tunicati affini che sono stati manipolati in modo da avere una versione alternativa dell'allele.

In natura, le probabilità di scambiare i non affini per affini sono minime. Per ragioni che non sono del tutto chiare, i tipi di geni che si trovano in corrispondenza del complesso di istocompatibilità sono così variabili nell'ambito di una specie che, se due organismi possiedono lo stesso allele in questa sede, devono averlo acquisito da un antenato recente. Così, quando un tunicato tenta di fondere i propri tessuti con quelli di un altro, il sistema immunitario di quest'ultimo può riconoscere il tessuto invasore come estraneo o come simile (in altre parole, come affine o no) secondo la costituzione genetica che esso presenta in corrispondenza del complesso di istocompatibilità.

Anche il topolino domestico (*Mus musculus*) si basa sul complesso di istocompatibilità per riconoscere la parentela. Dato che i geni presenti in questo complesso influiscono sull'odore corporeo, si può dire che il topolino domestico dipenda da quest'ultimo carattere per distinguere gli affini. Proprio come per i tunicati, i geni presenti nel complesso di istocompatibilità del topo sono estremamente variabili, ma nei membri di una stessa famiglia gli alleli tendono ad essere gli stessi. Pertanto, gli individui che hanno lo stesso odore sono in genere affini. C. Jo Manning dell'Università del Nebraska e Wayne K. Potts ed Edward K. Wakeland dell'Università della Florida hanno osservato che le femmine del topolino domestico tendono ad accoppiarsi con maschi che abbiano un odore diverso, con lo scopo evidente di evitare l'inincrocio (ovvero l'incrocio tra parenti stretti). Formano tuttavia nidi comunitari con femmine che abbiano lo stesso odore, per esempio sorelle, il che contribuisce ad assicurare la sopravvivenza sia dei figli sia dei nipoti di entrambi i sessi.

L'odore delle vespe

Diversamente dai tunicati e dai topi, altri organismi si servono di segnali di origine ambientale per riconoscere gli affini. Uno di noi (Pfennig) ha studiato questo tipo di segnalazioni in certe vespe dette cartonaie per i nidi cartacei che costruiscono, in particolar modo *Polistes fuscatus*. Questi insetti, comuni nei giardini, abitano favi aperti fatti con fibre vegetali sottili come un'ostia. Le colonie consistono tipicamente in una regina e nelle sue figlie, le operaie.

Il riconoscimento della parentela è d'importanza decisiva perché i nidi sono visitati spesso da altre vespe con varie intenzioni. In alcuni casi, i visitatori sono parenti rimasti senza casa perché i loro nidi sono stati distrutti da predatori, per esempio dagli uccelli. In altri, gli intrusi vengono per rubare le uova che servono ad alimentare le larve nelle loro colonie attive. Prima di lasciar entrare gli invasori, le vespe devono riuscire a distinguere tra gli affini privi di protezione, che però saranno potenziali coadiutori, e gli individui non affini, che costituiscono una minaccia per il nido.

Le vespe cartonaie o polistine riescono a compiere direttamente questa distinzione ricorrendo a sostanze odorose. Pfennig, George J. Gamboa della Oakland University, Hudson K. Reeve e Janet Shellman-Reeve della Cornell University hanno scoperto che ogni vespa acquisisce dal proprio nido un odo-

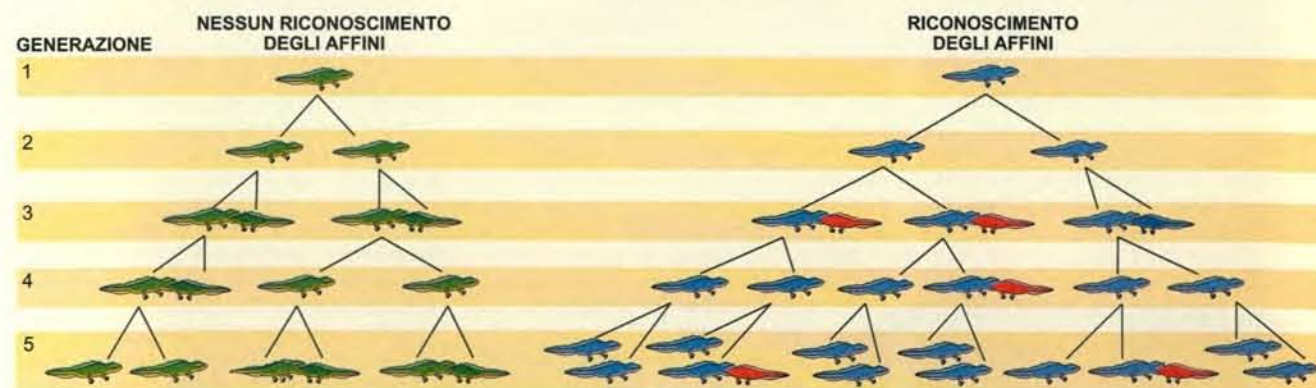
GENERAZIONE — NESSUN RICONOSCIMENTO DEGLI AFFINI — RICONOSCIMENTO DEGLI AFFINI

1

2

3

4

5

La capacità di riconoscimento degli affini può contribuire al successo di un gruppo di organismi. In questo esempio, ciascuna salamandra dà vita a due figli (*viene mostrato soltanto uno dei due genitori*), che però non sopravvivono tutti perché le salamandre ricorrono al cannibalismo quando scarseggia il cibo. Per esempio, nella terza generazione, solo la metà delle salamandre che non sono in grado di riconoscere gli affini (*in verde*) sopravvive fino alla riproduzione; le altre vengono divorate dai fratelli. Invece tre salamandre su quattro sopravvivono nelle famiglie che riescono a identificare gli affini (*in blu*) dato che metà dei membri di queste famiglie divora salamandre appartenenti a un'altra famiglia (*in rosso*). A partire dalla quinta generazione, la famiglia geneticamente predisposta a distinguere gli affini prende il sopravvento.

re che è specifico degli insetti che vi vivono. Questo odore, che serve da segnale di riconoscimento, si incorpora nell'epicuticola, o rivestimento esterno, della vespa prima che esso si indurisca. Karl E. Espelie dell'Università della Georgia e colleghi hanno determinato che l'odore è dovuto ad alcuni idrocarburi provenienti sia dalle fibre vegetali della «carta» di cui è fatto il nido, sia da secrezioni prodotte dalle vespe che lo hanno costruito. Poiché ogni colonia utilizza uno specifico miscuglio di piante nella costruzione del proprio nido, spesso vi è maggiore probabilità che i membri di una famiglia condividano questo tipo di segnale di origine ambientale anziché uno di origine genetica. Infatti il rimescolamento e la ricombinazione di geni che hanno luogo durante la riproduzione sessuale fanno in modo che i membri di una famiglia, benché geneticamente simili, non siano identici.

Sia i segnali di origine genetica sia quelli di origine ambientale possono tuttavia condurre a errori. Se l'animale si basa esclusivamente su segnali captati dall'ambiente, potrebbe compiere errori che lo indurrebbero ad assistere erroneamente estranei che vivono in ambienti analoghi al suo. Questi sfruttatori raccoglierebbero così il frutto di una generosità erroneamente indirizzata senza ricambiare in alcun modo e finirebbero per prendere il sopravvento nella popolazione. Il dipendere soltanto da segnali di origine genetica potrebbe a sua volta indurre un individuo ad accettare conspecifici non affini, dotati di alleli «fuorilegge» che codificano proprio per il carattere che serve al riconoscimento. Anche in questo caso, gli alleli degli sfruttatori si diffonderebbero in tutta la popolazione. Il basarsi su segnali di origine genetica fa, infine, aumentare il rischio di commettere errori trattando erroneamente come estranei e rifiutando affini che, per puro caso, non possiedono il carattere che serve al riconoscimento.

La probabilità che si verifichino questi tipi di errori dipende dalla costituzione genetica degli organismi interessati e dall'ambiente in cui essi vivono. In organismi come i tunicati e i topi l'eventualità che due soggetti non imparentati abbiano caratteri genetici comuni viene ridotta al minimo sfruttando regioni dei cromosomi che sono variabili nell'ambito di una specie, ma relativamente costanti in una famiglia. Queste etichette genetiche sono particolarmente utili per organismi che vivono in un ambiente chimico piuttosto uniforme, come uno scoglio su cui potrebbero insediarsi parecchie colonie di tunicati. Per organismi come le vespe cartonaie, che vivono in aree più difformi, segnalazioni più accurate possono provenire da etichette di origine ambientale.

Interpretare un segnale

Dopo che un segnale di riconoscimento è stato prodotto da un organismo, come lo utilizzano gli altri conspecifici per stabilire se esiste un rapporto tra loro e il primo organismo? Per quanto ne sappiamo, questi segnali sono sempre appresi. Perfino il sistema immunitario deve imparare a riconoscere il sé (si veda l'articolo *Come il sistema immunitario impara a riconoscere il «sé»* di Harald von Boehmer e Pawel Kisielow in «Le Scienze» n. 280, dicembre 1991). In effetti, se non lo facesse, attaccherebbe qualunque tessuto dell'organismo.

Gli esseri viventi imparano a riconoscere i segnali provenienti dal proprio corpo, dai loro affini o dall'ambiente e ricavano da essi un'«impronta», proprio come fanno gli uccelli nell'apprendimento del canto. Nella maggior parte dei viventi il processo di apprendimento ha luogo in una fase precoce dell'esistenza, quando è probabile che essi vivano in mezzo a parenti. Il ricordo dei compagni è durevole, il che assicura che, per tutta l'esistenza, un organismo potrà sempre confrontare l'immagine dei parenti con i caratteri fisici di un altro individuo. Inoltre molti organismi aggiornano di tanto in tanto le impronte in loro possesso, in modo da poter continuare a riconoscere i parenti a mano a mano che i segnali di questi si modificano, per esempio con l'età.

Per illustrare il ruolo dell'apprendimento nel riconoscimento degli affini, si consideri il contributo del nido nel caso delle vespe cartonaie. In esperimenti di laboratorio, vespe allontanate dal nido e dai loro coinquilini hanno riconosciuto in seguito come affini sia costoro sia individui estranei. Le vespe allontanate solo dal nido, ma non dai coinquilini, hanno di nuovo trattato come affini tutte le vespe. Infine, quelle messe in presenza di un nido diverso dal loro hanno imparato a trattare come affini le vespe che uscivano da questo nido. Solo in presenza del nido queste vespe imparano a riconoscere il segnale chimico che consente loro di distinguere gli affini dai non affini.

Diversamente dalle vespe cartonaie, le api domestiche (*Apis mellifera*) imparano a riconoscere segnali di identificazione che provengono dai compagni di nido e da loro stesse. Questa differenza potrebbe essere dovuta alla diversa modalità di accoppiamento delle regine delle due specie. Gli alveari dell'ape domestica contengono spesso operaie generate da più di una decina di fuchi, mentre le operaie delle vespe polistine sono di solito generate da un unico maschio. Di conseguenza, le compagne di alveare delle api domestiche sono una mescolanza di sorelle e sorellastre, mentre le compagne di alveare delle vespe sono prevalentemente sorelle.

Per distinguere tra sorelle e sorellastre, un'ape operaia deve riconoscere i geni che ha ricevuto dal proprio padre e deve ricavare la stessa informazione anche dall'ape che prende in esame. Le occorre, dunque, un meccanismo di autoispezione, fenomeno che Richard Dawkins dell'Università di Oxford ha soprannominato «effetto ascella». Wayne M. Getz e Katherine B. Smith dell'Università della California a Berkeley hanno dimostrato che api allevate in isolamento imparavano a riconoscere il proprio odore, e favorivano quindi le sorelle che avevano un odore simile rispetto alle sorellastre (nate dalla stessa madre e da padre diverso), la cui costituzione genetica un poco differente dava luogo a un altro odore. Non è chiaro se le api domestiche imparino a distinguere il proprio odore anche in condizioni di sovraffollamento dell'alveare.

Una volta avvenuto il riconoscimento, l'individuo deve decidere l'azione da compiere, secondo il contesto dell'incontro. Per esempio, le operaie delle vespe polistine sono particolarmente intolleranti nei riguardi di vespe non affini quando queste invadono il loro nido (dove potrebbero rubare le uova). Secondo un modello teorico sviluppato da Reeve, perché possa aver luogo una discriminazione la somiglianza tra le caratteristiche fisiche degli individui presi in osservazione e le impronte in possesso dell'osservatore deve essere al di sopra di un certo valore critico. Questo valore dipende dalla frequenza con cui gli organismi si trovano contemporaneamente in presenza di individui affini e non affini, nonché da quanto sia conveniente correre il rischio di respingere gli affini o di accettare i non affini.

Il modello di Reeve contribuisce a spiegare certi errori di discriminazione. Per esempio, Anne B. Clark del SUNY a Binghamton e David F. Westneat, Jr., dell'Università del Kentucky hanno trovato che i maschi dell'itteride *Agelaius phoeniceus* alimentano tutti i piccoli presenti nel nido, anche se in media un piccolo su quattro non è loro figlio in quanto le femmine di solito si accoppiano con più di un maschio. Presumibilmente, l'efficienza riproduttiva è maggiore se un genitore maschio alimenta tutti i piccoli presenti nel nido, sprecando solo una piccola quantità di energia per nutrire quelli che non sono suoi, piuttosto che rischiare di lasciare senza cibo un proprio piccolo.

I maschi dell'itteride *Agelaius phoeniceus* alimentano indistintamente tutti i piccoli che trovano nel nido. Per la maggior parte questi sono effettivamente loro figli; pertanto gli adulti traggono beneficio in senso riproduttivo dal fatto di prendersi cura di tutti i piccoli piuttosto che rischiare di far morire di fame un figlio.

Affari di famiglia

Dopo quattro anni trascorsi allo zoo di Filadelfia, durante i quali non aveva avuto figli, Jessica, un raro esemplare di gorilla di pianura (*nella fotografia*), è stata trasferita allo zoo di San Diego. Qui è rimasta subito incinta e, la vigilia di Natale del 1991, ha dato alla luce Michael.

La discriminazione verso gli affini può spiegare per quale motivo Jessica non si sia unita ad alcun partner fino a quando non le sono stati presentati maschi diversi da quelli con i quali aveva sempre vissuto fin dalla nascita. In natura questi maschi sarebbero, in generale, parenti, e probabilmente Jessica considerava esattamente in questo modo i suoi compagni allo zoo. Per evitare il pericolo dell'inincrocio, gli animali non mostrano solitamente molto interesse sessuale nei confronti dei parenti stretti.

Nel caso di specie che si sono ormai ridotte a una singola limitata popolazione, l'identificazione come affini di individui che sono familiari, ma non realmente imparentati, può costituire un problema particolarmente grave. Basandosi su una buona conoscenza del processo di riconoscimento degli affini, i responsabili dei giardini zoologici possono impedire agli animali loro affidati di commettere questi errori e, così facendo, facilitare la riproduzione di specie in pericolo di estinzione.

Parenti cannibali

Torniamo ora al problema del perché molti organismi sono in grado di distinguere i loro affini. Il significato evolutivo di questo riconoscimento è chiaramente illustrato dalle specie in cui alcuni individui possono danneggiare i loro stessi parenti. Certi protozoi, rotiferi, nematodi e larve di anfibi esistono in due forme che differiscono tra loro per le preferenze alimentari: possono essere onnivori o cannibali. Quale via un individuo imbocchi dipende principalmente dall'ambiente nel quale è cresciuto, anche se entrambi i tipi di comportamento alimentare si possono trovare all'interno di una stessa famiglia.

Gli animali cannibali ci riportano anche alla teoria della *fitness* complessiva. Secondo questa linea di pensiero, i cannibali dovrebbero essersi evoluti per evitare di mangiare la propria prole, dati i costi genetici che una simile pratica avrebbe: una famiglia che mostrasse un comportamento del genere probabilmente non sopravviverebbe a lungo.

Per verificare una simile previsione abbiamo studiato i tipi di riconoscimento della parentela nei girini di uno scafiopo (*Scaphiopus bombifrons*), i quali si sviluppano in stagni temporanei nel deserto. Questi girini possiedono un mezzo speciale per procurarsi cibo supplementare e accelerare così la crescita in modo da abbandonare in tempo gli stagni, che si prosciugano rapidamente.

Tutti i girini di scafiopo sono, all'inizio della loro esistenza, animali onnivori, e si alimentano in primo luogo di detriti. Occasionalmente, però, si mangiano tra loro o catturano un gambero d'acqua dolce. Questo evento può innescare una serie di modificazioni nella dimensione del girino, come pure nella sua forma e muscolatura e, cosa più importante, nelle preferenze alimentari. I girini modificati diventano esclusivamente carnivori e si alimentano di altri animali, compresi i membri della propria specie.

Che un girino divori realmente i membri della propria famiglia o no dipende dall'equilibrio tra costi e benefici di un simile comportamento. Questo equilibrio si modifica in funzione dello sviluppo del girino e del fabbisogno di cibo. Per esempio, se il girino rimane onnivoro, tende ad aggregarsi in banchi, che consistono in primo luogo di fratelli; i girini cannibali invece si associano spesso con individui a cui non sono legati da vincoli di parentela e li divorano.

I carnivori sbocconcellano altri girini e, dopo questo «test di assaggio», li mangiano se non sono imparentati con loro o li lasciano liberi, senza danneggiarli, se sono fratelli. È interessante notare che i carnivori hanno una minore probabilità di evitare di mangiare fratelli e sorelle quando sono affamati che non quando sono sazi. Chiaramente i girini cessano di discriminare i propri simili quando la loro stessa sopravvivenza è minacciata: in fin dei conti, un girino carnivoro è sempre più affine a se stesso che non a un fratello.

La salamandra tigre (*Ambystoma tigrinum*) si presenta anch'essa in due tipi: uno onnivoro dalla testa piccola, che si nutre prevalentemente di invertebrati, e uno carnivoro dalla testa grossa, che si alimenta principalmente di altre salamandre. Tutte le larve sono all'inizio onnivore e tipicamente rimangono tali se crescono tra fratelli; spesso però si trasformano in cannibali se crescono in mezzo a non affini. Non sviluppandosi come cannibali in presenza di fratelli, le salamandre riducono la probabilità di danneggiare i propri parenti. Assieme a James P. Collins dell'Arizona State University, abbiamo trovato che gli animali cannibali preferiscono non banchettare con parenti stretti quando vengono somministrate loro larve più piccole con cui hanno una parentela più lontana. Bloccando temporaneamente il loro olfatto, siamo riusciti a determinare che la discriminazione si basa su segnali di natura chimica.

Nuove sfide e interessanti prospettive

Oltre agli argomenti standard forniti dalla teoria dell'idoneità complessiva, possono esservi altre ragioni per le quali gli organismi riconoscono gli affini. Per esempio, Pfennig e un suo allievo, Michael Loeb, assieme a Collins, hanno accertato che le larve della salamandra tigre vengono spesso colpite in natura da un batterio letale. Inoltre questi ricercatori hanno determinato che vi è una probabilità particolarmente elevata che i cannibali siano infettati quando si alimentano di membri ammalati della propria specie. Forse allora la selezione naturale favorisce i cannibali che evitano di mangiare i propri affini, sottraendosi così a quegli agenti patogeni che si trasmettono più facilmente tra parenti stretti, i quali sono dotati di sistema immunitario simile. Un ragionamento del genere sottintende che il riconoscimento della parentela può essersi evoluto non soltanto per assicurare la sopravvivenza degli affini, ma anche semplicemente per proteggere la vita stessa dell'individuo.

Questi recenti risultati hanno messo in dubbio le interpretazioni tradizionali del riconoscimento della parentela e

hanno dimostrato che i biologi hanno ancora molto da imparare su questo processo. Nel corso del nostro lavoro speriamo di acquisire una conoscenza più approfondita dell'evoluzione di interazioni sociali diverse come l'altruismo e il cannibalismo. A causa della connessione fondamentale tra sistema immunitario e meccanismo di riconoscimento della parentela, speriamo anche che ulteriori studi siano in grado di rivelare in dettaglio come funzionino questi sistemi.

La ricerca sul riconoscimento della parentela può avere anche alcune applicazioni pratiche. Mary V. Price e Nickolas M. Waser dell'Università della California a Riverside hanno scoperto che la speronella *Delphinium nelsonii* è in grado di riconoscere il polline di piante affini. Oltre a ciò, Stephen J. Tonsor della Michigan State University e Mary F. Wilson del Forestry Sciences Laboratory di Juneau, in Alaska, hanno potuto osservare che alcune angiosperme, come *Phytolacca americana* e *Plantago lanceolata*, crescono più rapidamente se vengono messe in vaso con piante sorelle o sorellastre, piuttosto che con piante non affini. Se questi effetti legati alla parentela sono diffusi nel mondo vegetale, potrebbero essere sfruttati vantaggiosamente nelle colture.

Gli scienziati stanno indagando sul riconoscimento della parentela da più di mezzo secolo e oggi disponiamo di una buona quantità di informazioni su una grande varietà di piante e animali. Le ricerche in corso ci consentiranno di formulare un'interpretazione a vasto raggio del significato di questo fenomeno.

DAVID W. PFENNIG è docente di ecologia, etologia ed evoluzione all'Università dell'Illinois.

PAUL W. SHERMAN insegna comportamento animale alla Cornell University e si occupa in particolare del comportamento sociale del cinomio e dell'eterocefalo glabro.

REEVE HUDSON K., *The Evolution of Conspecific Acceptance Thresholds* in «American Naturalist», 133, n. 3, marzo 1989.

HEPPER PETER G. (a cura), *Kin Recognition*, Cambridge University Press, 1991.

MANNING C. JO, WAKELAND EDWARD K. e POTTS WAYNE K., *Communal Nesting Patterns in Mice Implicate MHC Genes in Kin Recognition* in «Nature», 360, n. 6404, 10 dicembre 1992.

PFENNIG DAVID W., SHERMAN PAUL W. e COLLINS JAMES P., *Kin Recognition and Cannibalism in Po-lyphenic Salamanders* in «Behavioral Ecology», 5, n. 2, estate 1994.

Dalla complessità alla perplessità

di John Horgan

Si potrà giungere a una teoria unificata dei sistemi complessi? Perfino gli esperti dell'Istituto di Santa Fe ne dubitano

Al Museo della cultura e delle arti indiane di Santa Fe, nel New Mexico, spumeggiano champagne e grandi idee: è in corso una cena dell'Istituto di Santa Fe, un centro di ricerca dove persone complesse meditano su temi complessi. Sono presenti alcuni dei massimi luminari dell'Istituto, tra cui il premio Nobel Murray Gell-Mann, che ha contribuito alla scoperta dei quark, col suo cipiglio perennemente scettico; il profeta della vita artificiale Christopher G. Langton, nella sua uniforme di jeans, scarponi da contadino, gilet di cuoio e braccialetto d'argento; l'esperto di economia non lineare W. Brian Arthur, col suo faccione rubicondo, di recente invitato dalla Casa Bianca ad assumere importanti incarichi; e l'improvvisatore intellettuale Stuart A. Kauffman, dal contegno serafico e insieme cogitabondo. In mezzo a questi pionieri della scienza si trovano anche vari «amici dell'Istituto», tra cui il megafilantropo George Soros e Cormac McCarthy, romanziere di grande successo.

Prima che tutti si avventino sul filetto, David Liddle, imprenditore nel campo dei calcolatori e presidente del consiglio di amministrazione, fa una rassegna dei risultati ottenuti dall'Istituto. «Abbiamo molti motivi di orgoglio» dice; ed è vero, almeno sotto il profilo delle pubbliche relazioni. L'Istituto non è grande: a Santa Fe ci sono soltanto sei ricercatori a tempo pieno, e altrove lavorano altri cinquanta «membri esterni». Tuttavia, nei suoi dieci anni di vita, l'Istituto ha ricevuto molta benevola attenzione dalla stampa, compresa «Scientific American», e parecchi libri di divulgazione ne hanno parlato con favore. È ormai noto per essere un centro guida degli studi sulla complessità, un luogo dove scienziati insofferenti della tediosa scienza riduzionista del passato stanno costruendo una nuova visione unitaria della natura, del comportamento sociale umano, della vita e dell'universo stesso. [Ai personaggi che lavorano in quello straordinario «pensatoio» che è l'Istituto di Santa Fe è dedicato un interessante volume uscito quest'anno nella traduzione italiana di Libero Sosio: *Complessità. Uomini e idee ai confini tra ordine e caos* di Morris Mitchell Waldrop, Instar Libri, Torino, 1995. *n.d.r.*]

Ciò che Liddle non dice è che perfino alcuni degli scienziati legati all'Istituto cominciano a preoccuparsi del divario che separa questa retorica dalla realtà. Tra questi il biologo matematico Jack D. Cowan, dell'Università di Chicago, che ha partecipato alla fondazione dell'Istituto e fa tuttora parte del consiglio. Cowan non è uno scienziato reazionario: ha persino studiato i processi neurochimici che stanno alla base delle barocche visioni provocate dall'LSD. Ma alcuni dei teorici di Santa Fe hanno un rapporto «bocca-cervello» troppo alto per i suoi gusti: secondo lui «hanno battuto troppo la grancassa».

Cowan ritiene che alcune delle ricerche condotte a Santa Fe siano interessanti e importanti, ma deplora che gli studi tendano «a degenerare in un uso del calcolatore fine a se stesso». Inoltre troppi specialisti di simulazione soffrono di quella che Cowan chiama sindrome da reminiscenza. «Dicono: "Guarda un po', questo non ti ricorda un fenomeno biologico o fisico?" E vi si buttano a testa bassa come se fosse un buon modello del fenomeno, ma di solito si tratta solo di una vaga somiglianza fortuita.» La scoperta più importante che è venuta finora dall'Istituto, secondo Cowan, è che «fare scienza dei sistemi complessi è molto difficile».

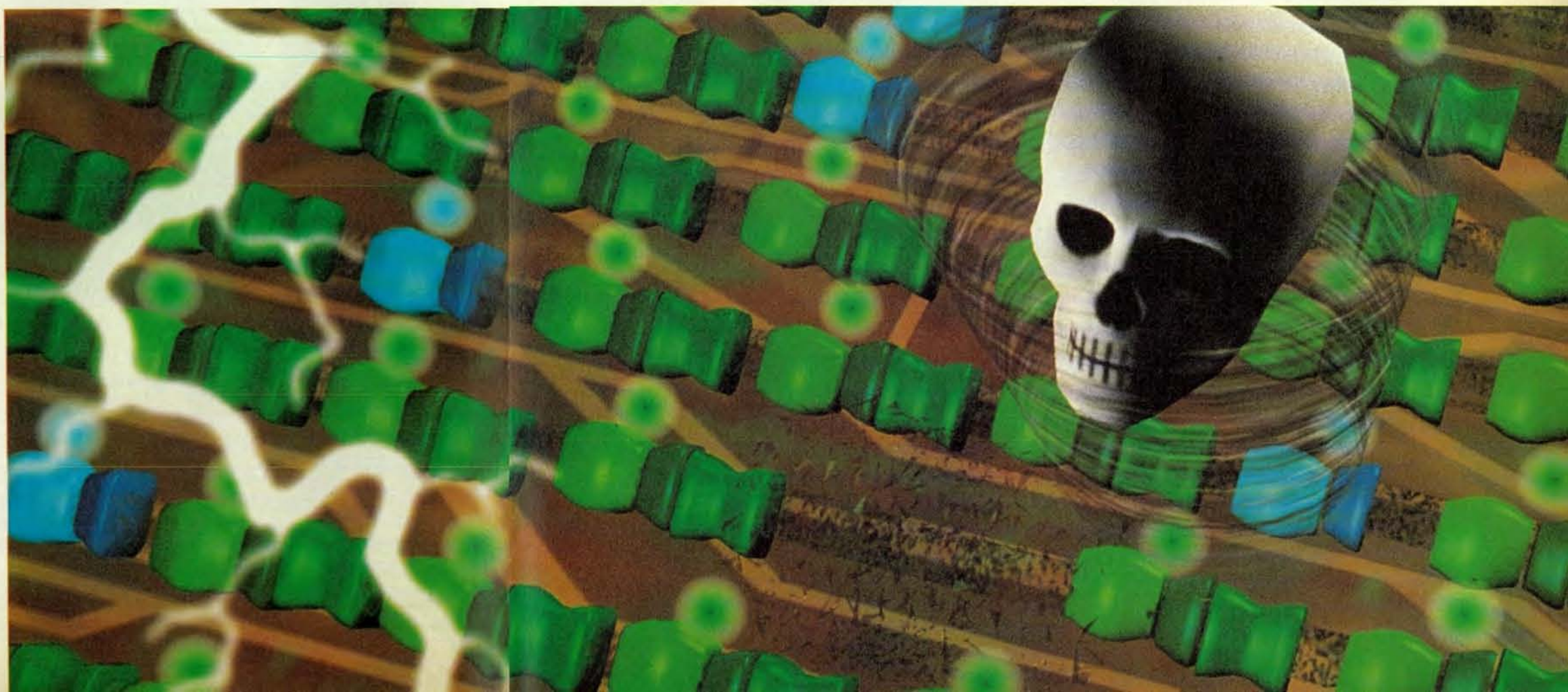
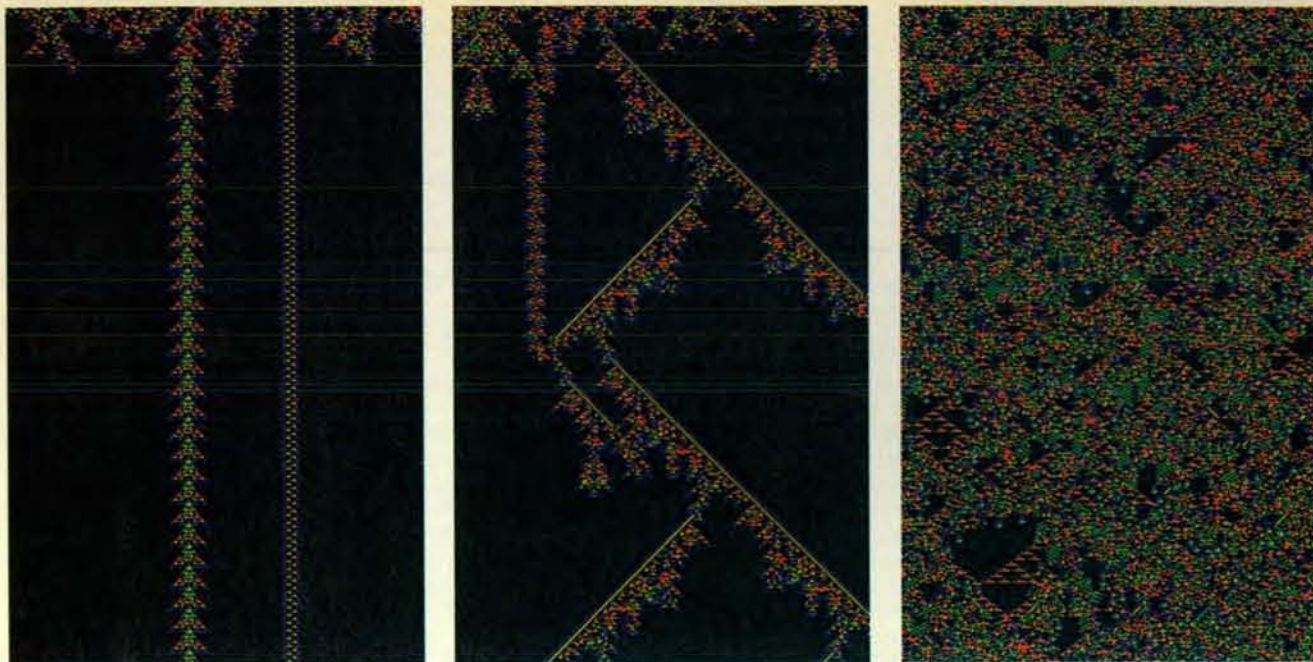
Secondo alcuni dei ricercatori impiegati a tempo pieno, sono stati i media ad aver esagerato le aspettative. «Per il 90 per cento è colpa dei giornalisti» spiega Arthur. Tuttavia l'economista non può fare a meno di atteggiarsi a fervente sostenitore del progresso: «Se Darwin avesse avuto un calcolatore sulla scrivania chissà che cosa sarebbe stato capace di scoprire!». Chissà: forse avrebbe scoperto molte cose sui calcolatori e pochissime sulla natura.

Il massimo vanto dei «santafedisti» sarebbe quello di riuscire a formulare una «teoria unificata» dei sistemi complessi. Due anni fa l'informatico John H. Holland, che lavora all'Università del Michigan e all'Istituto di Santa Fe, illustrò a una conferenza una prospettiva straordinariamente ambiziosa: «Molti dei nostri più gravi problemi a lunga scadenza: la bilancia commerciale, lo sviluppo sostenibile, l'AIDS, i difetti genetici, la salute mentale, i virus informatici, ruotano intorno a sistemi di enorme complessità. I sistemi in cui questi problemi si presentano - l'economia, l'ecologia, il sistema immunitario, l'embrione, il sistema nervoso, le reti informatiche - sono di natura altrettanto varia quanto i problemi. Nonostante le apparenze, tuttavia, questi sistemi hanno importanti caratteristiche comuni, tanto che all'Istituto di Santa Fe li raggruppiamo in un'unica categoria: quella dei sistemi complessi adattativi (SCA). Non si tratta solo di terminologia: riteniamo infatti che esistano princìpi generali che regolano il comportamento degli SCA, e che questi princìpi possano indicarci i metodi per risolvere i grandi problemi attuali.» Si noti che Holland è considerato uno dei complessologi più modesti.

Oggi alcuni ricercatori disconoscono l'obiettivo di una teoria unificata. «Non so neppure che cosa significhi» afferma Melanie Mitchell, un'ex studentessa di Holland che lavora a Santa Fe. «A qualche livello si può certo asserire che tutti i sistemi complessi sono manifestazioni degli stessi princìpi soggiacenti, ma non credo che questo sia molto utile.» Privato di questa visione unificatrice, tuttavia, l'Istituto di Santa Fe perderebbe molto del suo lustro e diventerebbe uno dei tanti luoghi dove i ricercatori usano calcolatori e altri strumenti per affrontare i problemi dei loro rispettivi settori. E in fondo non è questo ciò che fanno tutti gli scienziati?

I ricercatori che conoscono la storia di altre teorie che miravano all'unificazione non sono ottimisti sulle prospettive dei loro confratelli di Santa Fe. Tra i dubbiosi c'è il premio Nobel per l'economia Herbert A. Simon, della Carnegie Mellon University, che ha dato contributi anche all'intelligenza artificiale e alla sociobiologia. «Quasi tutti quelli che parlano di queste grandi teorie sono stati contagiati dalla matematica, ma credo che il concetto di unificazione subirà un declino.» Rolf Landauer della IBM, che ha dedicato la sua carriera allo studio dei legami tra fisica, calcolo e informazione, è d'accordo e accusa i complessologi di cercare un «criterio magico» che li aiuti a dipanare tutti gli aggrovigliati intrichi della natura. «La pietra filosofale non esiste» dice Landauer.

Nella complessità i problemi cominciano già dal nome. I complessologi si sono dati molto da fare per distinguere il loro campo da quello del caos, un settore scientifico affine e assai popolare. Quando si è dissolto il polverone, si è visto che il caos riguarda un ristretto insieme di fenomeni che si evolvono

Pubblicizzata fino a morire? La vita artificiale, uno dei settori fondamentali della complessità, è, secondo uno dei suoi critici, «una scienza che prescinde dai fatti», ma eccelle nella produzione eidomatica. L'immagine, ottenuta da Thomas R. Ray dell'Università del Delaware e dell'Istituto di Santa Fe, illustra l'evoluzione della vita nel ciberspazio. Gli oggetti verdi e azzurri sono programmi che si autoreplicano; il lampo indica «mutazioni» casuali; il cranio è il Mietitore, una routine che esercita una pressione selettiva «uccidendo» i programmi meno adatti.

Il concetto di margini del caos è illustrato da queste immagini di automi cellulari prodotte da Christopher G. Langton dell'Istituto di Santa Fe. Langton e altri hanno ipotizzato che la complessità di un sistema equivalga alla sua capacità di calcolo; quest'ultima ha un massimo a un regime (*al centro*) posto tra gli stati molto ordinati (*a sinistra*) e quelli caotici (*a destra*). Altri hanno contestato sia l'interpretazione data da Langton ai propri esperimenti sia l'ipotesi di fondo dei margini del caos.

in modi prevedibilmente imprevedibili. Sono stati compiuti vari tentativi di fornire una definizione altrettanto precisa di complessità: la più reclamizzata fa riferimento ai «margini del caos». L'idea di fondo è che dai sistemi aventi un grado elevato di ordine e di stabilità, come i cristalli, non possa emergere nulla di nuovo; d'altro canto, i sistemi del tutto caotici, come i fluidi turbolenti o i gas caldi, sono *troppo* informi. Le cose davvero complesse (le amebe, i titoli di borsa e simili) si situano al confine tra l'ordine più rigido e la casualità.

Secondo i più, il concetto di margini del caos si deve a Christopher Langton e al suo collega Norman H. Packard (che ha coniato l'espressione). Partendo da certi esperimenti sugli automi cellulari, essi giunsero alla conclusione che la potenza di calcolo di un sistema, cioè la sua capacità di registrare ed elaborare informazioni, raggiunge il massimo in una ristretta zona situata tra un comportamento spiccatamente periodico e uno caotico. Ma gli studi sugli automi cellulari condotti da due altri ricercatori dell'Istituto di Santa Fe, James P. Crutchfield e la Mitchell, non hanno confermato le conclusioni di Packard e Langton. Crutchfield e la Mitchell dubitano anche che «la tendenza verso una capacità di calcolo universale rappresenti un fattore importante dell'evoluzione biologica». Alla Mitchell spiace che in risposta a queste critiche i sostenitori dei margini del caos continuino a cambiare la loro definizione: «È un bersaglio mobile», dice.

Sono state proposte altre definizioni della complessità: almeno 31, stando a un elenco compilato alcuni anni fa da Seth Lloyd, fisico del Massachusetts Institute of Technology e collaboratore dell'Istituto di Santa Fe. Quasi tutte fanno riferimento a concetti come l'entropia, la casualità e l'informazione, termini che a loro volta, come si sa, si sono dimostrati molto problematici. Tutte le definizioni presentano qualche svantaggio. Per esempio la definizione di complessità informazionale algoritmica, proposta dal matematico della IBM Gregory J. Chaitin, implica che la complessità di un sistema possa essere rappresentata dal più corto programma di calcolatore che lo descriva. Ma stando a questo criterio, un testo creato da una squadra di scimmie dattilografe è più complesso, perché più casuale, del *Finnegans Wake* di James Joyce.

La poesia della vita artificiale

Problemi del genere mettono in luce il fatto curioso che la complessità è, in un certo senso, un problema di prospettiva. A più riprese gli studiosi hanno discusso se la complessità abbia perso di significato fino al punto di dover essere abbandonata, ma la conclusione è sempre stata che il termine è troppo importante per le pubbliche relazioni. Spesso i complessologi impiegano il termine «interessante» come sinonimo di «complesso». Ma quale ente federale concederebbe sovvenzioni per una «ricerca unificata sulle cose interessanti»? (Tra parentesi, l'Istituto di Santa Fe riceverà circa metà del suo bilancio di cinque milioni di dollari per il 1995 dal Governo federale e il resto da benefattori privati.)

I complessologi non sono forse d'accordo sull'oggetto dei loro studi, ma per lo più concordano su come debbano affrontarlo: con i calcolatori. Questa fede nei calcolatori è ben rappresentata dalla vita artificiale, un settore della complessità che ha destato molta attenzione. La vita artificiale è l'erede filosofica dell'intelligenza artificiale, che l'ha preceduta di alcuni decenni. Mentre i ricercatori di intelligenza artificiale cercano di capire la mente imitandola su un calcolatore, i paladini della vita artificiale sperano di acquisire idee su una vasta gamma di fenomeni biologici. E, proprio come l'intelligenza artificiale, anche la vita artificiale ha generato più retorica roboante che risultati tangibili.

L'anno scorso, sul numero inaugurale della rivista «Artificial Life», Langton ha proclamato: «La vita artificiale ci insegnerà molte cose sulla biologia, cose che non avremmo potuto apprendere limitandoci a studiare i prodotti naturali della biologia. Ma prima o poi la vita artificiale andrà oltre la biologia, penetrando in un regno che ancora non ha nome, ma che comprenderà la cultura e la nostra tecnologia per darci una visione più ampia della natura».

A Langton si deve il concetto di «vita artificiale forte». Se un programmatore creasse un mondo di «molecole» che, seguendo regole analoghe a quelle della chimica, si organizzassero spontaneamente formando entità che mangiano, si riproducono e si evolvono, per Langton queste entità sarebbero vive, «anche se stanno dentro un calcolatore». Com'era inevitabile, la vita artificiale ha prodotto le società artificiali. Il politologo Joshua M. Epstein, che fa il pendolare tra Santa Fe e la Brookings Institution di Washington, sostiene che la simulazione al calcolatore della guerra, del commercio e di altri fenomeni sociali «modificherà a fondo il nostro modo di fare sociologia».

La vita artificiale e tutto il dominio della complessità sembrano basarsi su un seducente sillogismo: esistono insiemi semplicissimi di regole matematiche che, eseguite da un calcolatore, generano configurazioni di estrema complessità. Anche il mondo reale contiene configurazioni di grandissima complessità; quindi, alla base di molti fenomeni di grandissima complessità vi sono regole semplici. Tutto sta nel trovarle, ma con l'aiuto di calcolatori sempre più potenti si spera di riuscire nell'impresa.

Questo sillogismo fu confutato in un brillante articolo comparso l'anno scorso su «Science». Gli autori, sotto la guida di Naomi Oreskes, che insegna filosofia al Dartmouth College, ammoniscono che «la verifica e la convalida dei modelli numerici di sistemi naturali sono impossibili». Le sole proposizioni che si possono verificare, cioè dimostrare vere, sono quelle che riguardano i sistemi «chiusi», vale a dire basati sulla matematica pura e sulla logica. I sistemi naturali sono aperti: la conoscenza che possiamo averne è, nel migliore dei casi, sempre parziale e approssimata.

«Come un romanzo, un modello può essere convincente e può suonare vero se è coerente con la nostra esperienza del mondo naturale» dicono la Oreskes e i suoi colleghi. «Ma, come a proposito di un romanzo ci si può chiedere quanto i personaggi siano tratti dalla vita reale e quanto invece siano inventati, così anche riguardo a un modello ci si può domandare la stessa cosa: quanto è basato sull'osservazione e sulla misurazione di fenomeni accessibili, quanto su un giudizio motivato e quanto invece si deve alla convenienza?»

I modelli numerici funzionano bene soprattutto in astronomia e in fisica perché in questi campi gli oggetti e le forze obbediscono in modo assai preciso alla loro definizione matematica. Ma le teorie matematiche sono meno stringenti quando vengono applicate a fenomeni più complessi, in particolare a quelli del mondo biologico. Come ha osservato Ernst Mayr, il noto specialista di biologia evolutiva tuttora alla Harvard University nonostante i suoi 91 anni, ciascun organismo è unico; e ciascun organismo, inoltre, si modifica da un istante all'altro. Ecco perché non si è riusciti a «matematizzare» la biologia.

È sorprendente, ma Langton sembra accettare la possibilità che la ricerca sulla vita artificiale possa allontanarsi dal rigore con cui si usava affrontare altre discipline. Secondo lui, in futuro la scienza potrebbe diventare meno «lineare» e più «poetica». «La poesia corrisponde a un uso non lineare della lingua, in cui il significato va al di là della somma delle parti» spiega. «Ho l'impressione che, sotto il profilo culturale, nel futuro della scienza ci possa essere qualcosa di simile alla poesia.»

Una critica della criticità

Secondo John Maynard Smith, biologo dell'evoluzione all'Università del Sussex, la vita artificiale potrebbe aver già raggiunto questo traguardo. Smith, che è stato uno dei primi a usare la matematica in biologia, si è interessato da subito alle ricerche dell'Istituto di Santa Fe, dove ha soggiornato già due volte. Ma la sua conclusione è che la vita artificiale sia «in sostanza una scienza svincolata dai fatti». Durante la sua ultima visita, rammenta, «l'unica volta che è stato ricordato un fatto è stato quando l'ho citato io, e la cosa è stata giudicata di cattivo gusto».

Non tutti i complessologi accettano l'idea che il loro campo sia destinato a diventare una scienza «morbida». Di sicuro non l'accetta il fisico Per Bak, del Brookhaven National Laboratory, che fa parte dei ricercatori di Santa Fe. Roteando gli occhi da gufo, il combattivo Bak emette sentenze a ruota libera. Per esempio afferma che la fisica delle particelle e la fisica della materia condensata hanno ormai superato il loro culmine. Il caos aveva fatto il suo tempo già nel 1985, due anni prima della pubblicazione del libro bomba *Chaos* di James Gleick. «Non c'è niente da fare!» esclama Bak. «Quando una cosa raggiunge le masse, è già finita!» (La complessità, ovviamente, rappresenta l'eccezione alla regola di Bak.)

Bak e altri hanno formulato un modello che alcuni considerano il principale candidato a una teoria unificata della complessità: la criticità autorganizzata. Il sistema paradigmatico di Bak è un mucchio di sabbia. Quando si aggiunge sabbia in cima al mucchio, esso si «organizza» tramite frane e si porta in quello che Bak chiama stato critico. Se si fa un grafico della grandezza e della frequenza delle frane, i risultati si distribuiscono secondo una legge di potenza inversa: la probabilità delle frane decresce al crescere della loro grandezza.

Bak osserva che molti fenomeni, tra cui i terremoti, le fluttuazioni della borsa, l'estinzione delle specie viventi e anche l'attività cerebrale, manifestano questo andamento e conclude che «sotto *deve* esserci una teoria.» Questa teoria potrebbe spiegare perché i terremoti piccoli sono frequenti e quelli grandi sono rari, perché le specie vivono milioni di anni e poi scompaiono, perché le borse crollano e perché la mente umana può rispondere con tanta rapidità ai dati in ingresso.

«Non sappiamo spiegare tutto di tutto, ma qualcosa di tutto», dice Bak, e aggiunge che le ricerche sui sistemi complessi provocheranno una «rivoluzione» nelle scienze tradizionalmente morbide, come l'economia, la psicologia e la biologia evolutiva. «Nei prossi-

Il disaccordo sulle definizioni

Come potranno gli scienziati formulare una teoria unificata dei sistemi complessi se non riescono a mettersi d'accordo neppure sulla definizione di complessità? Seth Lloyd ha compilato un elenco di 31 modi diversi di definire la complessità. Eccone alcuni:

Entropia. La complessità coincide con l'entropia, o disordine, di un sistema, secondo la definizione termodinamica.

Informazione. La complessità coincide con la capacità del sistema di «sorprendere» o informare un osservatore.

Dimensione frattale. La «sfumatezza» di un sistema, il grado di dettaglio che esso manifesta a scale sempre più piccole.

Complessità effettiva. Il grado di «regolarità» (opposto alla casualità) manifestato da un sistema.

Complessità gerarchica. La diversità manifestata dai vari livelli di un sistema avente struttura gerarchica.

Complessità grammaticale. Il grado di universalità del linguaggio necessario per descrivere un sistema.

Profondità termodinamica. L'entità delle risorse termodinamiche necessarie per costruire un sistema da zero.

Complessità computazionale temporale. Il tempo necessario a un calcolatore per descrivere un sistema (o per risolvere un problema).

Complessità computazionale spaziale. La quantità di memoria necessaria per descrivere un sistema.

Informazione reciproca. La quantità di informazione che una parte del sistema fornisce su (o di somiglianza che presenta rispetto ad) altre parti del sistema.

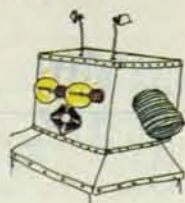
mi anni queste discipline si trasformeranno in scienze esatte così come sono diventate scienze esatte la fisica delle particelle e la fisica dello stato solido.»

Nel suo best-seller *Earth in the Balance*, il vicepresidente degli Stati Uniti Al Gore afferma che la teoria di Bak l'ha aiutato a capire non solo la fragilità dell'ambiente ma anche «i cambiamenti della mia vita». Invece Sidney R. Nagel dell'Università di Chicago afferma che il modello di Bak non fornisce una valida descrizione neppure per un mucchio di sabbia. Nagel e altri ricercatori di Chicago hanno scoperto che il loro mucchio di sabbia tendeva a oscillare tra immobilità e grandi frane anziché manifestare un comportamento retto dalla legge della potenza inversa.

Bak ribatte che il suo modello è stato confermato da altri esperimenti su mucchi di sabbia. Nondimeno il modello potrebbe avere un carattere statistico così generale da non riuscire in realtà a spiegare neppure i sistemi che descrive. In fondo molti fenomeni possono essere descritti da una curva gaussiana, cioè a campana, ma pochi scienziati sosterrebbero che le prestazioni dell'intelligenza umana e la luminosità apparente delle galassie derivino da cause comuni. «Se una teoria vale per tutto, forse non vale per niente» osserva Crutchfield, ricercatore di Santa Fe. E aggiunge: «Perché una teoria sia utile non basta la statistica, ci vogliono anche i meccanismi».

La cibernetica e altri disastri

I complessologi non sono i primi scienziati di questo secolo a pensare di poter formulare una teoria matematica, diciamo di quasi tutto. Alcuni precedenti illustri:

La cibernetica. Nel suo libro del 1948 *Cybernetics, or Control and Communication in the Animal and the Machine*, il matematico Norbert Wiener tentò di dimostrare come una teoria basata sulla retroazione e su altri concetti dell'ingegneria potesse spiegare il funzionamento non solo delle macchine ma anche dei fenomeni biologici e sociali. Il sogno di Wiener non si è avverato, ma il suo neologismo, tratto dal greco *kybernetes*, cioè timoniere, è rimasto patrimonio della cibercultura.

La teoria delle catastrofi. Negli anni sessanta il matematico francese René Thom formulò la teoria delle catastrofi. Benché all'inizio fosse un puro formalismo matematico, in seguito Thom e altri cominciarono a sostenere che essa poteva descrivere una vasta gamma di fenomeni caratterizzati da brusche discontinuità: dalla metamorfosi di un bruco in farfalla al collasso di una civiltà. Verso la fine degli anni settanta, dopo aver destato un interesse frenetico, la teoria delle catastrofi subì a sua volta un collasso; un critico concluse che il lavoro di Thom «non fornisce informazioni nuove su alcunché».

Il caos. Alcuni specialisti del caos (che studiano i sistemi caratterizzati da biforcazioni, da sensibilità alle condizioni iniziali e da altri comportamenti definiti in termini matematici) sostengono che il loro settore è ancora vitale. Ma quattro anni fa il matematico francese David Ruelle, uno dei pionieri del caos, affermò che «nonostante i frequenti annunci trionfali di "nuovi" progressi clamorosi, [*il caos*] ci ha fornito un numero sempre minore di scoperte interessanti».

La teoria dell'informazione. Formulata nel 1948 da Claude E. Shannon, questa teoria forniva un metodo per quantificare il contenuto d'informazione di un messaggio. Essa costituisce ancora oggi il fondamento teorico della codifica e della compressione dei dati, della crittografia e di altri settori dell'elaborazione dell'informazione. I tentativi di applicare la teoria dell'informazione ad altri campi, dalla fisica alla biologia alla psicologia e addirittura alle arti, in genere sono falliti, soprattutto perché la teoria non riesce ad affrontare il problema del significato dei messaggi.

Un altro scettico è il premio Nobel Philip W. Anderson, fisico della materia condensata a Princeton, che fa parte del consiglio dell'Istituto di Santa Fe. Nel saggio *More is Different*, pubblicato su «Science» nel 1972, Anderson sosteneva che la fisica delle particelle, anzi qualsiasi impostazione riduzionista, ha una capacità limitata di spiegare il mondo. La realtà ha una struttura gerarchica, argomentava Anderson, e ogni livello è in qualche misura indipendente dai livelli superiori e da quelli inferiori. «A ogni stadio occorrono leggi, descrizioni e concetti affatto nuovi, che richiedono altrettanta ispirazione e inventiva che al livello precedente» osservava Anderson. «La psicologia non è biologia applicata, così come la biologia non è chimica applicata.»

Gli altri complessologi

L'Istituto di Santa Fe non detiene il monopolio delle grandi idee legate alla complessità. Di recente altri due eminenti complessologi hanno sostenuto di aver compiuto progressi fondamentali che superano tutte le ricerche effettuate a Santa Fe.

Uno è il chimico belga Ilya Prigogine, che nel 1977 fu insignito del premio Nobel per i suoi studi sulle cosiddette strutture dissipative, e in particolare sulle celle chimiche «pompate», che non raggiungono mai l'equilibrio ma oscillano tra più stati. Sulla base di questi esperimenti, Prigogine, che oscilla a sua volta tra l'Istituto internazionale Solvay in Belgio e l'Università del Texas ad Austin, ha edificato una torre di idee sull'autorganizzazione, l'emergenza, i legami tra ordine e disordine: insomma sulla complessità.

La grande ossessione di Prigogine è il tempo. Egli sostiene che la fisica non ha dedicato sufficiente attenzione al fatto evidente che il tempo procede in una sola direzione. Di recente Prigogine, che ha 78 anni, ha formulato una nuova teoria che secondo lui renderebbe finalmente giustizia alla natura irreversibile della realtà. Questa teoria probabilistica elimina i paradossi filosofici che hanno afflitto la meccanica quantistica, riconciliandola con la meccanica classica, la dinamica non lineare e la termodinamica. Come corollario, dice Prigogine, questa teoria contribuirà a colmare il divario tra scienza e umanesimo, e ricreerà l'«incantesimo» della natura.

Il futurologo Alvin Toffler ha paragonato Prigogine a Newton, preconizzando che la prossima ondata della scienza sarà prigoginiana. Ma numerosi scienziati affermano che, se Prigogine dimostra eccellenti inclinazioni filosofiche, i suoi contributi concreti alla scienza sono in realtà estremamente limitati. «Non saprei indicare un solo fenomeno che egli abbia spiegato» dice Pierre C. Hohenberg della Yale University.

Dietro le quinte c'è un'altra presenza importante, quella del fisico ed ex fanciullo prodigio di origine britannica Stephen Wolfram, il quale, nei primi anni ottanta, diede un contributo al nascente campo della complessità prima di dedicarsi alla compilazione e alla vendita del suo riuscitissimo software «Mathematica».

Wolfram è sconcertato da quanto è accaduto presso l'Istituto di Santa Fe negli ultimi dieci anni. «Quando guardo tutti quei libri iperbolici mi viene da ridere» commenta, e rivela che sta scrivendo un libro che risolverà molti dei problemi fondamentali di questo settore, «ma ancora non ne posso parlare».

Poi ne parla, ma solo un po'. Fin dai tempi di Isaac Newton, dice, la scienza è stata dominata dalla fede nel potere della matematica, in particolare delle equazioni differenziali. Nel suo libro Wolfram sosterrà che certe semplici famiglie di regole logiche, per esempio quelle che stanno alla base del funzionamento degli automi cellulari, potrebbero costituire un linguaggio molto più potente per la descrizione della realtà.

Wolfram vuole evitare le pretese esagerate che hanno inquinato l'Istituto di Santa Fe. «Non credo che ciò che sto facendo sia una teoria del tutto» osserva, e sarà «contentissimo» se il suo contributo sarà anche solo altrettanto importante, per esempio, della scoperta del calcolo differenziale da parte di Newton.

More is different divenne uno slogan per il caos e la complessità ma, paradossalmente, il principio di Anderson sembra implicare che questi sforzi antiriduzionisti non potranno mai culminare in una teoria unificata dei sistemi complessi, una teoria, cioè, che illumini tutto, dal sistema immunitario all'economia. Anderson lo ammette. «Non penso che esista una teoria del tutto, ma piuttosto che esistano princìpi fondamentali di grandissima generalità» come la meccanica quantistica, la meccanica statistica, la termodinamica e le rotture di simmetria. «Ma non si deve cedere alla tentazione di credere che un buon principio generale valido a un dato livello debba valere a tutti i livelli.»

Anderson è favorevole alla visione della natura espressa dal biologo dell'evoluzione Stephen Jay Gould di Harvard, secondo cui la vita è plasmata non tanto da leggi deterministiche quanto da circostanze contingenti e imprevedibili. «Il pregiudizio che cerco di esprimere è, credo, un pregiudizio a favore della storia naturale» dichiara Anderson.

Le sue opinioni sono in netto contrasto con quelle di Stuart Kauffman, uno dei più ambiziosi esperti di vita artificiale. Kauffman ha passato decine di anni cercando di dimostrare, mediante raffinate simulazioni al calcolatore, che la teoria di Darwin da sola non è in grado di spiegare l'origine della vita o la sua successiva evoluzione.

Kauffman condivide la preoccupazione del suo ex insegnante John Maynard Smith sul contenuto scientifico di certe ricerche di vita artificiale. «A un certo punto - spiega - la vita artificiale devia verso una regione in cui non so dire dove stia il confine tra un discorso sul *mondo*, cioè sulle cose esterne, e i puri giochi informatici, le forme artistiche e i passatempi. Quando faccio una simulazione al calcolatore, cerco sempre, o quasi sempre, di capire come funziona qualcosa che fa parte del mondo.»

Grazie alle sue simulazioni, Kauffman è giunto ad alcune conclusioni. Una è che, quando un sistema composto di sostanze chimiche semplici raggiunge un certo livello di complessità o di interconnessione (e Kauffman ha collegato entrambe le cose al concetto di margini del caos e alla criticità autorganizzata di Bak), esso compie una transizione radicale, cioè un cambiamento di fase. Le molecole cominciano a combinarsi spontaneamente per formare molecole più grandi e di complessità crescente, dotate di capacità catalitica. Secondo Kauffman è un simile processo «autocatalitico» che ha portato alla vita, e non la formazione fortuita di una molecola capace di replicarsi.

«Oscurantismo e mistificazione»

Kauffman ha anche ipotizzato che gruppi di geni interagenti non si evolvano a caso, ma convergano verso un numero piuttosto piccolo di configurazioni o «attrattori», per usare un termine caro ai teorici del caos. Questo principio d'ordine, che Kauffman chiama «anticaos», potrebbe aver avuto una funzione più importante della selezione naturale nel guidare l'evoluzione biologica. Più in generale, Kauffman ritiene che le sue simulazioni potrebbero portare alla scoperta di una «nuova forza fondamentale» che si opporrebbe alla tendenza universale verso il disordine imposta dal secondo principio della termodinamica.

In un suo libro che verrà pubblicato entro quest'anno, *At Home in the Universe*, Kauffman afferma che tanto l'origine della vita sulla Terra quanto la sua evoluzione successiva non fossero «altamente improbabili», bensì in un certo senso inevitabili: è quasi certo che alcune forme di vita, magari simili alla nostra, esistano anche altrove nell'universo. Gli scienziati hanno discusso senza fine questo problema. Molti hanno adottato il punto di vista di Kauffman, mentre altri, come il grande biologo francese Jacques Monod, hanno sostenuto che la vita è in realtà «altamente improbabile». Dato che della vita extraterrestre non si sa nulla, è una questione di opinioni e non c'è simulazione al calcolatore che possa aiutarci a decidere.

Il collega di Kauffman Murray Gell-Mann, per di più, non crede neppure che ci sia bisogno di una nuova forza per dare una spiegazione scientifica alla comparsa dell'ordine e della complessità. In un libro del 1994, *The Quark and the Jaguar*, Gell-Mann traccia un quadro della natura abbastanza tradizionale (e riduzionista). La natura probabilistica della meccanica quantistica consente all'universo di dispiegarsi in un numero infinito di modi, in alcuni dei quali si presentano condizioni favorevoli alla comparsa dei fenomeni complessi. Quanto al secondo principio della termodinamica, esso permette la crescita temporanea dell'ordine in sistemi relativamente isolati e attraversati da un flusso di energia, come la Terra.

«Se si considera il mondo da questa prospettiva, tutto si sistema!» esclama. «E non siamo più infastiditi da questi bizzarri problemi!» Gell-Mann sottolinea che vi è ancora molto da imparare sui sistemi complessi, ed è per questo che ha collaborato alla fondazione dell'Istituto di Santa Fe. «Quello cui cerco di oppormi - dice - è una tendenza verso l'oscurantismo e la mistificazione.»

Forse i complessologi, anche se non riusciranno a creare una scienza per il prossimo millennio, potranno tracciare i confini del conoscibile. L'Istituto di Santa Fe sfiorò questa possibilità l'anno scorso in occasione di un simposio sui «Limiti della conoscenza scientifica». Per tre giorni, una ventina di scienziati, matematici e filosofi, discussero della possibilità che la scienza conosca ciò che non può conoscere. Dopotutto molti dei risultati più profondi della scienza del Novecento (la teoria della relatività, la meccanica quantistica, il teorema di Gödel, la teoria del caos) pongono limiti alla conoscenza.

Alcuni dei partecipanti, in particolare quelli legati all'Istituto, espressero la speranza che all'aumentare della potenza dei calcolatori aumenti anche la capacità della scienza di prevedere, controllare e capire la natura. Altri si dimostrarono scettici. Lo psicologo Roger N. Shepard, della Stanford University, manifestò il timore che, se anche riuscissimo a riprodurre con i calcolatori la complessità della natura, questi modelli potrebbero essere a loro volta così complicati da sfidare la comprensione. Il matematico brasiliano Francisco Antonio Doria sorridendo mestamente mormorò: «Si passa dalla complessità alla perplessità». E tutti assentirono.